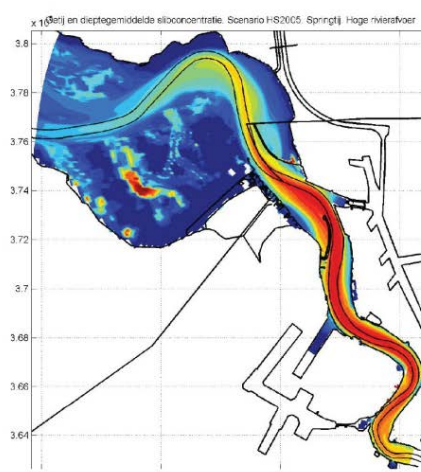


Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid De rol van slib in de Westerschelde Basisrapport grootschalige ontwikkeling G-3

01 oktober 2013

Colofon

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

☎: + 32 3 270 92 95

📠: + 32 3 235 67 11

Email: info@imdc.be

Website: www.imdc.be

Deltares

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

☎: + 31 (0)88 335 8273

📠: +31 (0)88 335 8582

Email: info@deltares.nl

Website: www.deltares.nl

Svašek Hydraulics BV

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

☎: +31 10 467 13 61

📠: +31 10 467 45 59

Email: info@svasek.com

Website: www.svasek.com

ARCADIS Nederland BV

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Arnhem, Nederland

☎: +31 (0)26 377 89 11

📠: +31 (0)26 377 85 60

Email: info@arcadis.nl

Website: www.arcadis.nl

Document Identificatie

Titel	Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde
Project	Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie
Opdrachtgever	Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen
Bestek nummer	16EF/2010/14
Documentref	I/RA/11387/13.080/GVH
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.10.01\G-3 - de rol van slib in de Westerschelde_v2.0.docx

Revisies / Goedkeuring

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	01/10/2013	Finaal	J. Cleveringa / G. Dam	M. Taal / B. Blik	

Verdeellijst

1	Analoog	Youri Meersschaut
1	Digitaal	Youri Meersschaut

De rol van het slib in de sedimentbalans van de Westerschelde

Eindrapport

G3; 1630/U12376/C/GD

13 augustus 2013

SVASEK
HYDRAULICS
COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS

Document titel	De rol van het slib in de sedimentbalans van de Westerschelde
	ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde- estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid
Verkorte Titel	Slib in de sedimentbalans van de Westerschelde
Status	Eindrapport
Datum	13 augustus 2013
Project naam	Lange termijn Visie Westerschelde, Veiligheid & toegankelijkheid
Project nummer	1630
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Waterdienst, Vlaamse Overheid, Afdeling Maritieme Toegang
Referentie	G3; 1630/U12376/C/GD
Auteur	Gerard Dam, Jelmer Cleveringa
Gecontroleerd door	Marcel Taal, Bram Blik

INHOUDSOPGAVE

		Pag.
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Zand en slib	1
1.3	Leeswijzer	1
2	OVERZICHT LITERATUUR EN MEETGEGEVENS	3
2.1	Sedimentbalans studies	3
2.2	Slibbalans studies	5
2.3	Metingen naar de herkomst van slib	6
2.4	Slibgehalte metingen in de bodem	8
2.4.1	De Looft (1978) en De Looft (1980)	8
2.4.2	McLaren data	8
2.4.3	Overige data	10
3	BEREKENING VOLUMEBIJDRAGE SLIB OP SEDIMENTBALANS IN DE WESTERSCHELDE	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Berekening volumebijdrage slib	12
3.3	Belang van het Middelgat als berging van slib	14
3.4	Slib verandering per diepteklasse	15
3.5	Geen volume effecten door menging of ontmenging van zand en slib?	17
3.6	Conclusies	18
4	VAN SEDIMENTBALANS NAAR ZAND- EN SLIBBALANS	19
4.1	Inleiding	19
4.2	Uitsplitsing zand en slib	21
4.3	Balansen	23
4.4	Onzekerheden	24
4.4.1	Omvang van de slibsedimentatie	24
4.4.2	Diep en ondiep	25
4.4.3	Randvoorwaarden	26
4.5	Discussie en conclusies	26
5	UITKOMSTEN ZAND EN SLIB MODELLEN	28
5.1	Inleiding	28
5.2	Zandmodellen	28
5.2.1	Geschematiseerde Westerschelde (Van der Wegen en Roelvink, 2008)	28
5.2.2	Delft3d model van Bolle et al., 2010	28
5.2.3	Geactualiseerd Delft3d model	29
5.2.4	Geactualiseerd morfologische FINEL2d model	29
5.3	Slibmodellen	30
5.4	Zand/slib model	31
5.5	Conclusie	31
6	CONCLUSIES EN DISCUSSIE	32
6.1	Algemeen beeld	32
6.2	Discrepantie tussen modellen en sedimentbalans	32

6.3	Onzekerheden	32
6.4	Aanbevelingen	32
7	LITERATUUR	34

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

In de sedimentbalansen¹ van de Westerschelde en Zeeschelde is, afhankelijk van de keuze voor de randvoorwaarden, overwegend import van sediment van de monding naar de Westerschelde te zien. Hierbij wordt vaak verondersteld dat het gaat om zand. De resultaten van numerieke modellen, die vrijwel alleen met de zandfractie rekenen, suggereren een overwegende export van zand richting de monding.

Het transport en de depositie van slib wordt niet gemodelleerd, maar maakt wel onderdeel uit van het sediment in de balansen. Dit is een van de aanleidingen om te onderzoeken wat de rol van de slibfractie in de sedimentbalans van het Schelde-estuarium is. Hierbij wordt in dit rapport begonnen met een overzicht voor de Westerschelde. Er wordt nader gekeken naar de gegevens over slib en de rol van het slib in de sedimentbalans. Ook worden uitkomsten van modelsimulaties van de zandtransporten in het estuarium beschouwd, zoals die onder andere zijn opgenomen in rapport G11 van Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013c). Dit rapport sluit aan op rapport G2 (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013d), waar de grootschalige sedimentbalans gepresenteerd is.

1.2 Zand en slib

Het verschil tussen zand en slib kan beschreven worden als het verschil in gedrag van de deeltjes tijdens erosie, het transport en het bezinken en de sedimentatie. De fijne slibdeeltjes ‘plakken aan elkaar’, oftewel vertonen cohesief gedrag, waardoor het eroderen lastig gaat. Als de slibdeeltjes eenmaal in de waterkolom zweven, dan blijven ze relatief makkelijk en lang zweven, omdat ze een lage valsnelheid hebben. De slibdeeltjes zijn over het algemeen niet alleen kleiner dan zandkorrels, maar hebben ook nog een lager soortelijk gewicht en een onregelmatiger vorm en tezamen levert dit een lagere valsnelheid. Als er heel veel slibdeeltjes in het water aanwezig zijn dan gaan de deeltjes elkaar in de weg zitten en treden verschillende processen op, waardoor het transport en de sedimentatie lastiger te voorspellen wordt. Als de slibdeeltjes eenmaal op de bodem liggen, dan is dat in eerste instantie in een ongeconsolideerde laag met veel water. Pas na verloop van tijd wordt deze laag steviger en wordt het eroderen lastiger. Bij zandkorrels speelt dit allemaal niet.

Doordat het gedrag van slib tijdens erosie, transport en sedimentatie anders is dan het gedrag van zand, komt het slib op andere plekken (en andere momenten) tot afzetting in het estuarium. Er vindt een ruimtelijke differentiatie plaats.

Hoewel het verschil in gedrag niet alleen wordt veroorzaakt door het verschil in de korrelgrootte van de deeltjes, is dit wel de factor waarop zand en slib worden onderscheiden. De korrels groter dan 63 µm worden beschouwd als zand en de korrels kleiner dan 63 µm worden beschouwd als slib.

In de voorliggende studie staat de bijdrage aan het sedimentvolume centraal. Naar verwachting levert de organische fractie in en aan het slib geen of een te verwaarlozen bijdrage aan het sedimentvolume in de Westerschelde.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd: In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de aanwezige data voor de slibfractie. In Hoofdstuk 3 wordt berekend hoeveel slib aanwezig is in de sedimentbalans van de Westerschelde. Hoofdstuk 4 laat zien wat dit vervolgens betekent voor de

¹ Hier staat sedimentbalansen omdat deze balansen de volumes aan sediment beschouwen en geen onderscheid wordt gemaakt in de samenstelling van het sediment. Dit geldt bijvoorbeeld voor de ‘Zandbalans’ van Rijkswaterstaat.

totale sedimentbalans van zowel zand en slib. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de uitkomsten van zand- en slibmodellen van het Schelde-estuarium. Hoofdstuk 6 bediscussieert de uitkomsten en geeft conclusies.

2 OVERZICHT LITERATUUR EN MEETGEGEVENS

2.1 Sedimentbalans studies

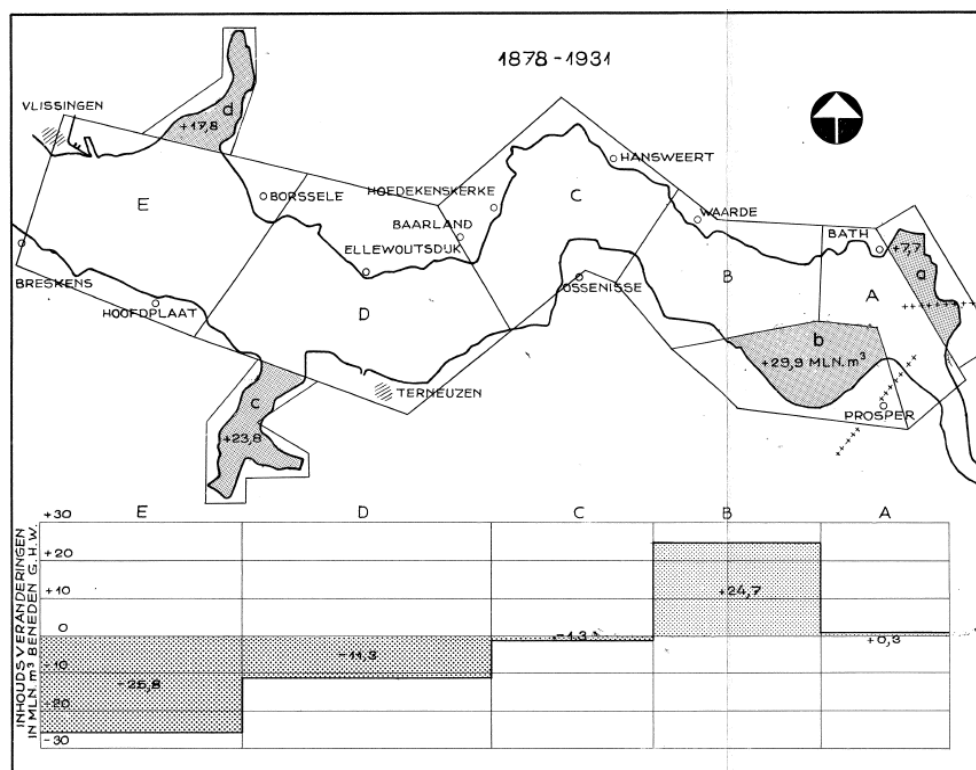
Voor het Schelde-estuarium en delen daarvan zijn diverse sedimentbalansen opgesteld om de inhoudsverandering te berekenen op basis van de bathymetrische opnames, verdisconteerd met de getallen voor baggeren, storten en zandwinnen. De meest recente studies zijn Nederbragt en Liek, (2004) en Haecon (2006). De eerstgenoemde studie laat tot de jaren '90 een import zien tot enkele miljoenen m^3 /jaar, gevolg door een periode waarin export werd berekend. In de Haecon balans wordt tot 1996 een import berekend en daarna een export. Beide studies laten dus in de jaren '90 de balans omslaan van import naar export (zie ook Bolle et al., 2010). In Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013d, waar deze rapportage op aansluit, is aangetoond dat deze export binnen de nauwkeurigheid van de metingen zit. In plaats daarvan kan beter gerekend worden met een import die sinds het begin van de jaren '90 enkele honderdduizenden m^3 per jaar bedraagt.

De studies van Nederbragt en Liek (2004) en Haecon (2006) heten “zandbalansstudies” omdat impliciet aangenomen werd dat de morfologische veranderingen in het estuarium het gevolg zijn van de verplaatsing van zand en dat slib een verwaarloosbare rol speelt. In feite betreft het steeds volumebalansen, waarin geen rol speelt hoe het volume is opgebouwd.

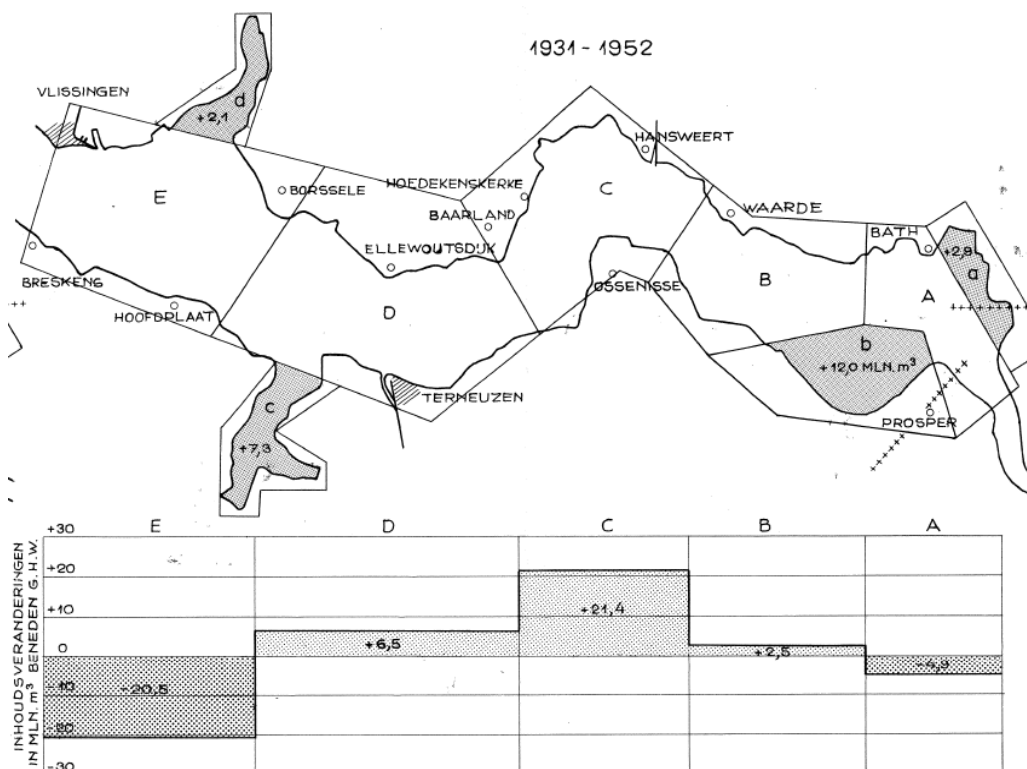
Een oudere sedimentbalans is opgesteld door Bakker en de Looff (1977) voor de periode 1878-1931 en 1931-1952, zie tabel 2.1, Figuur 2.1 en Figuur 2.2. Uit deze balansstudie komt dat er erosie heeft plaatsgevonden in het westelijk deel van de Westerschelde in beide periodes. In de eerste periode was de volumeverandering in de gehele Westerschelde zelfs negatief (-0.25 miljoen m^3 /jaar), maar de sedimentatie in de grote schorgebieden, die later ingepolderd zijn (Braakman, Hellegat, Saeftinghe, Sloe, Schorren van Ossenis), heeft de balans uiteindelijk door doen slaan naar import. In paragraaf 5.2.4 wordt ook gerefereerd naar deze periode.

Tabel 2.1: Totale sedimentveranderingen in miljoen m^3 voor de periode 1878-1931 en 1931-1952 (uit: Bakker en de Looff, 1977)

	1878-1931		1931-1952	
	Met grote schorgebieden	Zonder grote schorgebieden (huidige Westerschelde)	Met grote schorgebieden	Zonder grote schorgebieden (huidige Westerschelde)
Totaal	+65.8	-13.4	+30.6	+5.0
Gem. per jaar	+1.24	-0.25	+1.46	+0.24



Figuur 2.1: Volumeveranderingen 1878-1931 volgens Bakker en De Looff (1977)



Figuur 2.2: Volumeveranderingen 1931-1952 volgens Bakker en De Looff (1977)

2.2 Slibbalans studies

Er zijn in het verleden ook een aantal slibbalansen opgesteld en of slibfluxen bepaald voor Schelde estuarium. In deze balansen wordt meestal het gewicht (in tonnen droge stof) genoemd. Dit is anders dan bij de sedimentbalansen, die betrekking hebben op volumes (in m³).

Manni (1986) geeft een berekening van de slibbalans. Hij geeft de volgende waarden voor het blijvend afgezette slib in de Westerschelde:

Tabel 2.2: Slibbalans volgens Manni (1986)

Blijvend afgezet slib (ton/jr)	Minimum	Gemiddeld	Maximum
Schorren			
Westerschelde west	7.500	29.500	75.000
Westerschelde oost	21.500	85.500	215.000
Platen/slikken			
Westerschelde west		18.000	90.000
Westerschelde oost		24.000	112.000
Secundaire geulen			
Westerschelde west	100.000	200.000	300.000
Westerschelde oost	40.000	70.000	100.000
Totaal Westerschelde	169.000	427.000	892.000
Afzetting Beneden Zeeschelde			
Manni	120.000	240.000	1200.000

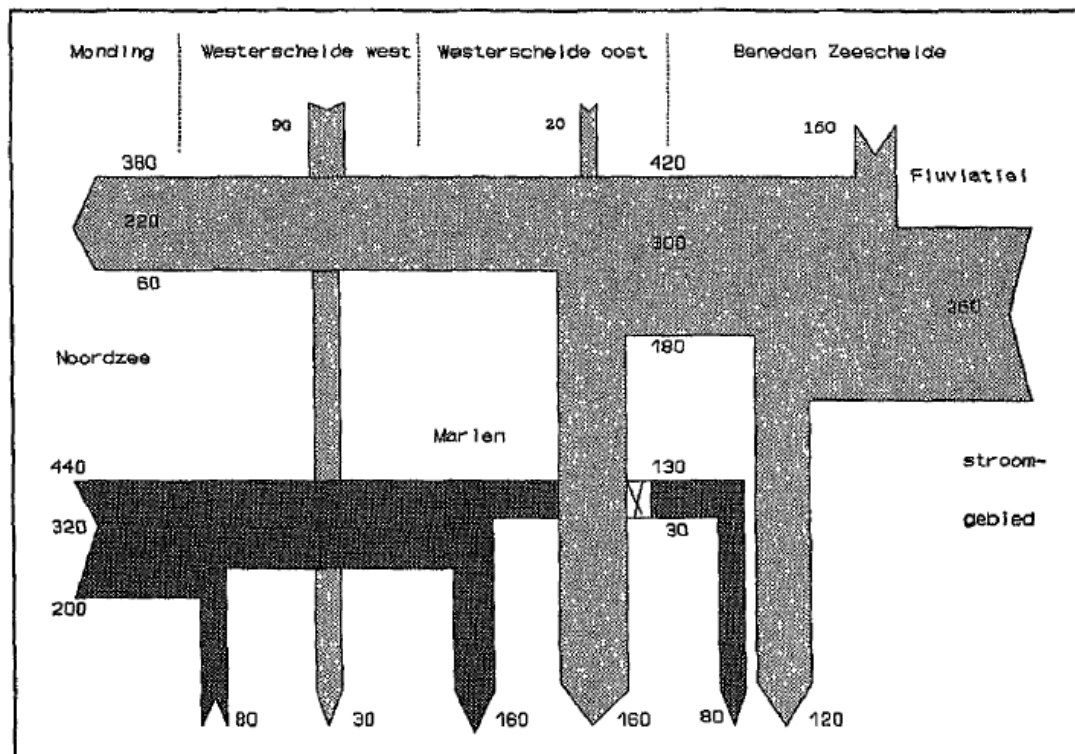
Manni (1986) geeft een schatting van de import van slib bij de monding van maximaal 0.5×10^6 ton /jaar. De aanvoer van Schelde slib schat Manni op 0.56×10^6 ton /jaar. Manni noemt de afzetting van slib in secundaire geulen van belang. Met name het Middelgat noemt hij als belangrijk afzetgebied van slib, gezien de hoge slibgehalten in de geul (tot 30%).

Ten Brinke (1992) heeft een slibbalans opgesteld waarbij diverse scenario's zijn gedefinieerd met betrekking tot de aannames. Hieruit kon niet eenduidig worden vastgesteld of er import of export van slib plaatsvond over de raai Vlissingen-Breskens.

Van Alphen (1990) geeft een import van marien slib van 0.6×10^6 ton/jaar over de lijn Vlissingen - Breskens.

Van Maldegem et al. (1993) en Van Maldegem (1993) geven een import van marien slib van $0.32 \pm 0.12 \times 10^6$ ton/jaar bij de mond, terwijl de export van fluviatiel slib 0.22×10^6 ton/jaar bedraagt, zie Figuur 2.3. Netto is er dus een import van 0.1×10^6 ton/jaar de Westerschelde in. De 0.32×10^6 ton/jaar marien slib sedimenteert permanent in de het Schelde estuarium. Het natuurlijk transport van fluviaal slib in zeewaartse richting wordt geschat op 0.3×10^6 ton/jaar bij de Nederlands-Belgische grens, waarbij netto nog 0.08×10^6 ton/jaar marien slib de grens passeert in stroomopwaardse richting. Er zijn nog wat kleine bijdragen van fluviatiel slib door afvoeren in de

Westerschelde zelf (zoals het spuikanaal van Bath en Kanaal Gent-Terneuzen). Zodoende berekent Van Maldegem een netto sedimentatie van marien en fluviatiel slib van 0.27×10^6 ton/jaar in de Westerschelde rond het jaar 1980 (zie Figuur 2.4). In de Beneden-Zeeschelde is de afzetting geschat op 0.2×10^6 ton/jaar.



Figuur 2.3: Netto slibtransporten in het Schelde estuarium rond 1980 in 10^3 ton/jaar (volgens Van Maldegem, 1993)

IMDC (1991) geeft een overzicht van de slibbalansen van de Zeeschelde, samen met een eigen berekening en geeft een range van 0-700.000 ton/jaar als afvoer naar de Westerschelde.

Taveniers (2000) berekent een fluviaale afvoer van 336.500 ton/jaar in 1999, waarbij er in die periode veel slib permanent verwijderd is uit de Beneden- Zeeschelde, zodat netto er een kleine import van slib (41.500 ton/jaar) vanuit de Westerschelde moet zijn om de balans sluitend te krijgen.

Zoals te zien is verschillen de getallen voor de slibbalans nogal. Dit is inherent aan de onnauwkeurigheden die gepaard gaan bij het opstellen van een dergelijke balans. De verschillende auteurs merken dit ook op en adviseren om de slibbalans te verbeteren met betere actuele data. De diverse auteurs zijn vrij eensgezind over de mariene slib import over de raai Vlissingen-Breskens en een zeewaarts transport van fluviaal slib over de grens Nederland-België, waarbij er permante afzetting van slib plaatsvindt in de Westerschelde.

2.3 Metingen naar de herkomst van slib

In deze paragraaf wordt een literatuur overzicht gegeven van metingen naar de herkomst van het slib.

Jacobs (2011) geeft een overzicht van de oorsprong van het slib gebaseerd op de kleifractie (tabel 2.3). Wartel en Van Eck (2000) hebben eerdere observaties in het Schelde estuarium samengevat in tabel 2.4. Beide studies geven aan dat het Schelde slib vooral bestaat uit een mengsel van smectiet en illiet met kleinere hoeveelheden kaolinit en chloriet. Het illiet is vooral afkomstig van erosie van Boomse klei binnen het estuarium. Het relatief hoge gehalte aan smectiet is afkomstig van Ieperse klei in de Straat van Dover. Met behulp van het getij worden deze klei deeltjes vervolgens naar de

Westerschelde gebracht, hetgeen resulteert in een hoog gehalte smectiet in het Nederlands deel van het estuarium (locatie 1 in tabel 2.3 en Westerschelde in tabel 2.4) en een lager gehalte in het rivier gedeelte in België (locatie 3-4 in tabel 2.3 en Zeeschelde in Tabel 2.4).

Tabel 2.3: Mineralogie van de klei fractie in het Schelde estuarium (Jacobs, 2011)

Locatie	Kaoliniet	Illiet	Smectiet	Chloriet
1: Terneuzen	8	15	77	Minimaal
2: Grens Nederland-Belgie	17	44	39	Geen
3: Kallosluis	31	49	20	Geen
4: Antwerpen	31	51	18	Minimaal

Tabel 2.4: Mineralogie van de klei fractie in het Schelde estuarium (Wartel en Van Eck, 2000)

Locatie	Kaloiniet	Illiet	Smectiet	Chloriet	Vermiculiet
Westerschelde (zwevend)	11	34	49	6	-
Beneden Zeeschelde	16	37	23	11	13

Terwindt (1967) laat zien dat op basis van mangaanmetingen het westelijk deel gedomineerd wordt door marien slib, het oostelijk deel een mix van marien en fluviaal slib en het Zeeschelde gedeelte door fluviaal slib.

Ten Brinke (1994) geeft een overzicht van tracer metingen naar de oorsprong van het slib. Conclusie hieruit is dat niet naar 1 tracer gekeken moet worden, maar dat een combinatie van verschillende tracers een beter beeld geeft. Hieruit blijkt dat het aandeel fluviatiel slib vrijwel lineair afneemt van Rupelmonding richting Vlissingen.

Verlaan (2000) heeft op basis van concentraties zware metalen in 66 bodemslib monsters de herkomst bepaald. Hij berekent dat in de in de Zeeschelde tussen Gent en Lillo de mariene fractie minder dan 10% is. Tussen Lillo en Saeftinghe neemt de invloed van het mariene slib sterk toe van 10 naar 75%. Verder zeewaarts in de Westerschelde neemt de mariene fractie verder toe van 75% naar 95%.

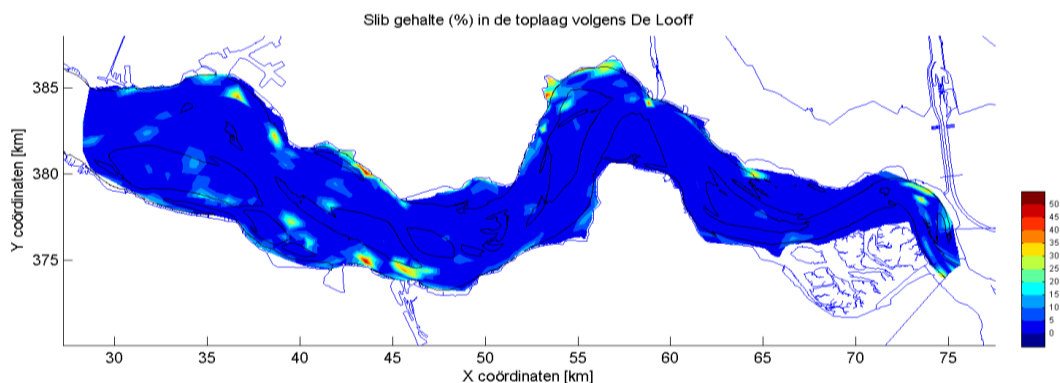
De natuurlijke koolstof isotoop $\delta^{13}\text{C}$ is door Chen (2005) gebruikt al tracer om de oorsprong van het slib te bepalen. Het fluviatische slibgehalte is bepaald door Chen (2005) op 90 % bij de Rupelmonding en 65 % bij de Nederlands/Belgische grens in het jaar 1993. In 1998 was dit ca. 70 % bij Rupelmonding en 55% bij de grens. Het aandeel marien slib is dus toegenomen over de tijd. Chen (2005) geeft als mogelijke verklaring dat dit door de uitvoering van de 2^e verdieping veroorzaakt is.

Al deze studies geven aan dat import van marien slib belangrijk is in de Westerschelde. In de Zeeschelde is fluviaal slib belangrijk, alhoewel deze invloed lijkt af te nemen door de uitgevoerde verdiepingen. Marien slib wordt stroomopwaarts verplaatst over de Nederlands/Belgische grens. Dyer (1995) geeft aan dat het slib in veel estuaria op gematigde breedtegraden een overwegend mariene oorsprong heeft. Deze mariene invloed strekt zich uit tot het Estuarine Turbiditeits Maximum (ETM). Dit lijkt dus ook te gelden voor de Westerschelde, waar het belangrijkste ETM zich ongeveer ter hoogte van Antwerpen bevindt, afhankelijk van rivierafvoer, getij een doortij-springtij variaties.

2.4 Slibgehalte metingen in de bodem

2.4.1 De Looff (1978) en De Looff (1980)

De Looff heeft in 2 gedeelten (oost 1978 en west in 1980) de sedimentsamenstelling van de Westerschelde bepaald. Onderstaand beeld is een gedigitaliseerd beeld vanuit de oorspronkelijke kaarten.



Figuur 2.4: Gemeten slib gehalte volgens De Looff (1978) en De Looff (1980)

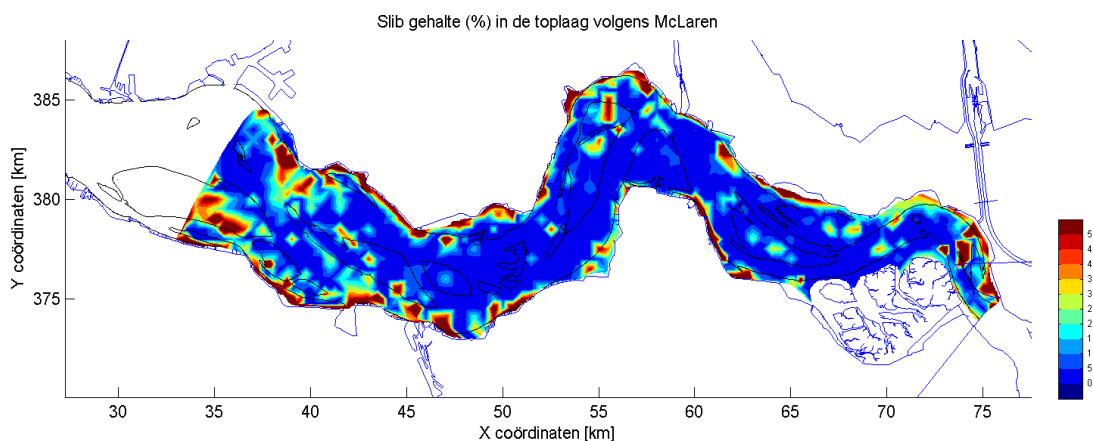
2.4.2 McLaren data

McLaren heeft in 1994 ook de slibgehaltes in de bodem bepaald. De door McLaren bepaalde gehalten zijn beduidend hoger dan de waarden die door De Looff (1978 en 1980) zijn gerapporteerd. De verschillen in de slibgehaltes hebben waarschijnlijk slechts gedeeltelijk betrekking op daadwerkelijke verschillen in het slibgehalte van de bodem. Veel bepalender voor de slibgehaltes zijn de verschillen in bemonstering, verwerken, de meetmethode en de definitie van slib. Ook voor de Waddenzee zijn door McLaren gehalten aan fijn sediment bepaald, die beduidend hoger zijn dan de getallen die door anderen zijn bepaald. Een uitgebreide vergelijking van McLaren-resultaten van de Waddenzee met andere slibmetingen is gerapporteerd in Zwarts (2004), maar voor de Westerschelde lijkt een dergelijke vergelijking niet beschikbaar te zijn. Tabel 2.5 geeft een overzicht van de grootste verschillen tussen de twee methoden. Alle verschillen tussen de methoden leiden tot een groter slibpercentage volgens McLaren.

Het is overigens niet zo dat de ene of de andere methode (en uitkomst) beter of slechter is (en dit geldt ook voor de veelvoud aan andere verwerkings- en meetmethoden).

Tabel 2.5: Methode bepalingen slibgehalte de Looff en McLaren.

	De Looff (1978 & 1980)	McLaren (1994)
Monstername	Raaien	grid
Voor- bewerking	Waarschijnlijk bodemkundig (niet expliciet gerapporteerd, maar af te leiden uit de beschikbare humus en kalk percentages) verwijderen organische- en kalkfractie.	Afzeven grove fractie (2 mm zeef), deze wordt wel meegenomen in de korrelgroottes.
Korrelgrootte bepaling	Microscopisch (met vergelijking resultaten zeefanalyse)	Malvern Laser Particle Sizer
Definitie slib	< 16 μm	< 63 μm (kleinere fracties ook beschikbaar)



Figuur 2.5: Gemeten slib gehalte volgens McLaren

Van Ledden (2003) heeft op basis van deze data een korte analyse gemaakt van de slibgehaltenes in de bodem. Zie Tabel 2.6.

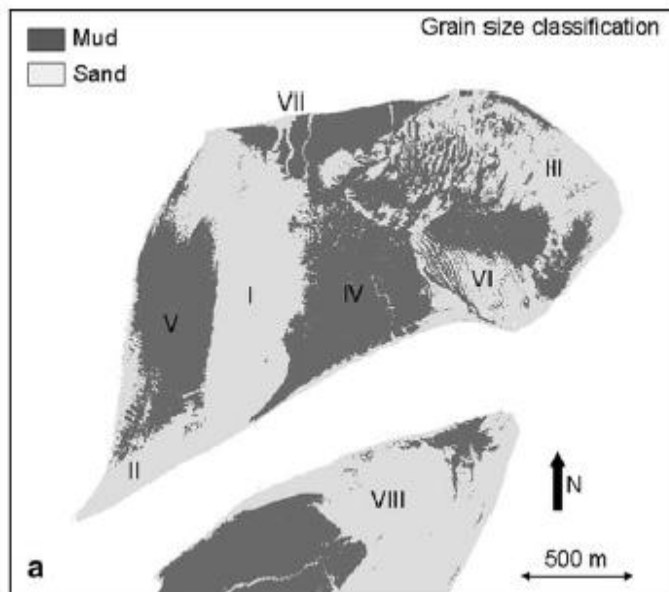
Tabel 2.6: Slibgehalte in de bodem (Uit: Van Ledden, 2003)

	Aantal samples	Gem. Korrelgrootte zand (μm)	Slib gehalte (%) ≤0.063mm)	% klei/ %slib
Westerschelde	1315	174 +/- 61	16.4 +/- 23.9	0.24
Beneden- Zeeschelde	215	157 +/- 93	44.3 +/- 36.2	0.28

Op basis van deze tabel kan gezegd worden dat het aandeel slib in de bodem niet verwaarloosbaar is. Verder valt op dat het gemiddelde slibpercentage in de bodem van de Beneden-Zeeschelde significant hoger ligt dan in de Westerschelde (44% versus 16%). Dit heeft, naar alle waarschijnlijkheid, te maken met de aanwezigheid van het turbiditeitsmaximum in de Beneden-Zeeschelde.

2.4.3 Overige data

Verder zijn er slibgehalte metingen uitgevoerd op diverse intergetijdengebieden. Deze zijn vaak gebruikt voor ecologische veldstudies. Vooral de omgeving van de Molenplaat is vaak bemeten. In Figuur 2.6 is het onderscheid zand/slib te zien zoals die gemeten is door Deronde et al. (2006) aan de hand van veld-data en satellietobservaties. Deze satellietobservaties zijn verder uitgewerkt door het NIOO voor de gehele intergetijdenbodem van de Westerschelde, maar zijn niet aanwezig bij deze auteur. Uit Figuur 2.6 (en ook de McLaren kartering in Figuur 2.5) blijkt dat de platen in de Westerschelde niet alleen puur uit zand bestaan, maar dat er ook een significant aandeel slibrijk (cohesief) plaatareaal aanwezig is.



Figuur 2.6: Bodemclassificatie op de Molenplaat; Mud gedefinieerd als >30% slib in de bodem. (Uit: Deronde et al., 2006)

Er zijn een aantal meer meetgegevens voor slibgehalten op de platen (o.a. de MOVE dataset), maar aangezien dit geen complete dekking geeft van de slibgehalten in de Westerschelde (met name het sublitoraal) is hier verder niet mee gewerkt. Het zou een nuttige aanvulling zijn op deze studie om fluctuaties in slibgehalten in het intergetijdengebied te analyseren op basis van deze data.

3 BEREKENING VOLUMEBIJDRAGE SLIB OP SEDIMENTBALANS IN DE WESTERSCHELDE

3.1 Inleiding

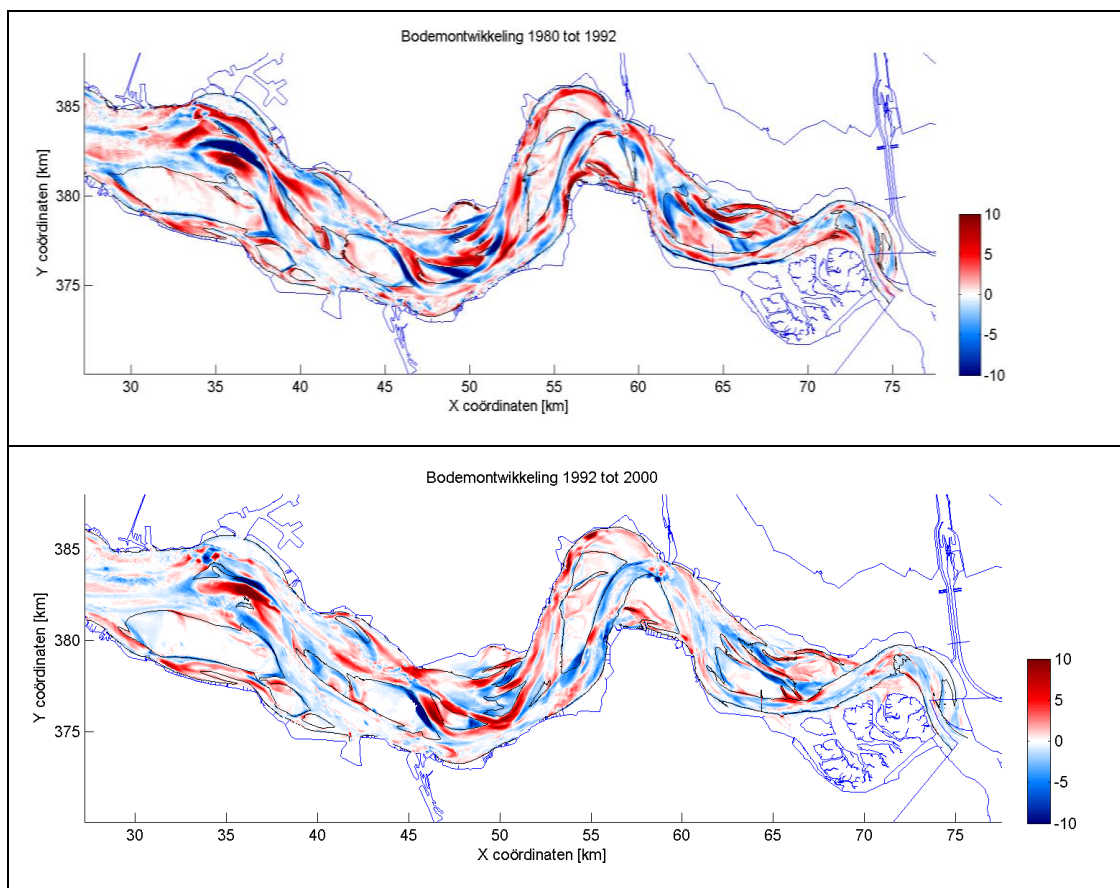
In dit hoofdstuk wordt een volumebijdrage van het slib berekend op de sedimentbalans van de Westerschelde.

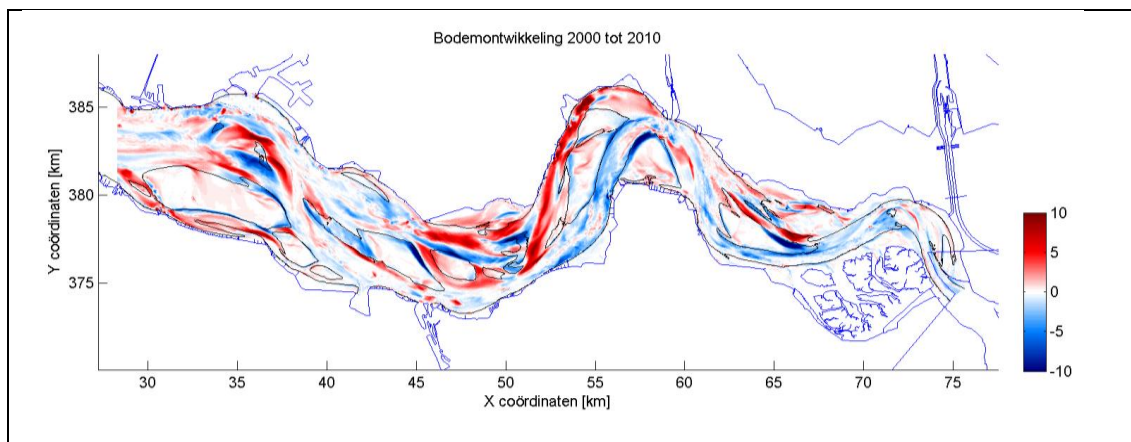
Voor 3 tijdvakken is de volumebijdrage van het slib in de balans bepaald. Deze perioden zijn:

- 1980-1992 (12 jaar);
- 1992-2000 (8 jaar);
- 2000-2010 (10 jaar);

De gemeten bodemontwikkeling van deze perioden is te zien in Figuur 3.1.

Omdat in de oudere bodemopnames het intergetijdengebied niet altijd opgemeten is, zijn de jaren gekozen dat deze wel in de opnamen zitten.





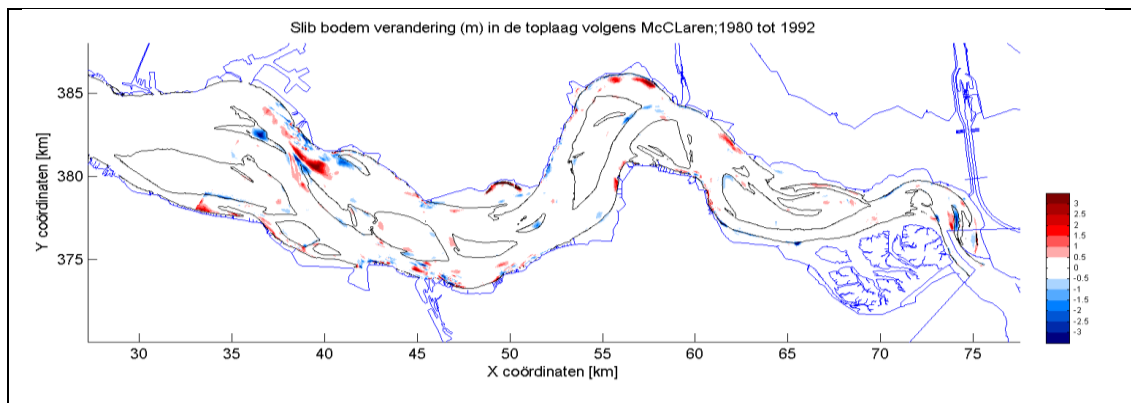
Figuur 3.1: Bodemontwikkeling voor drie tijdsperioden: 1980-1992; 1992-2000; 2000-2010

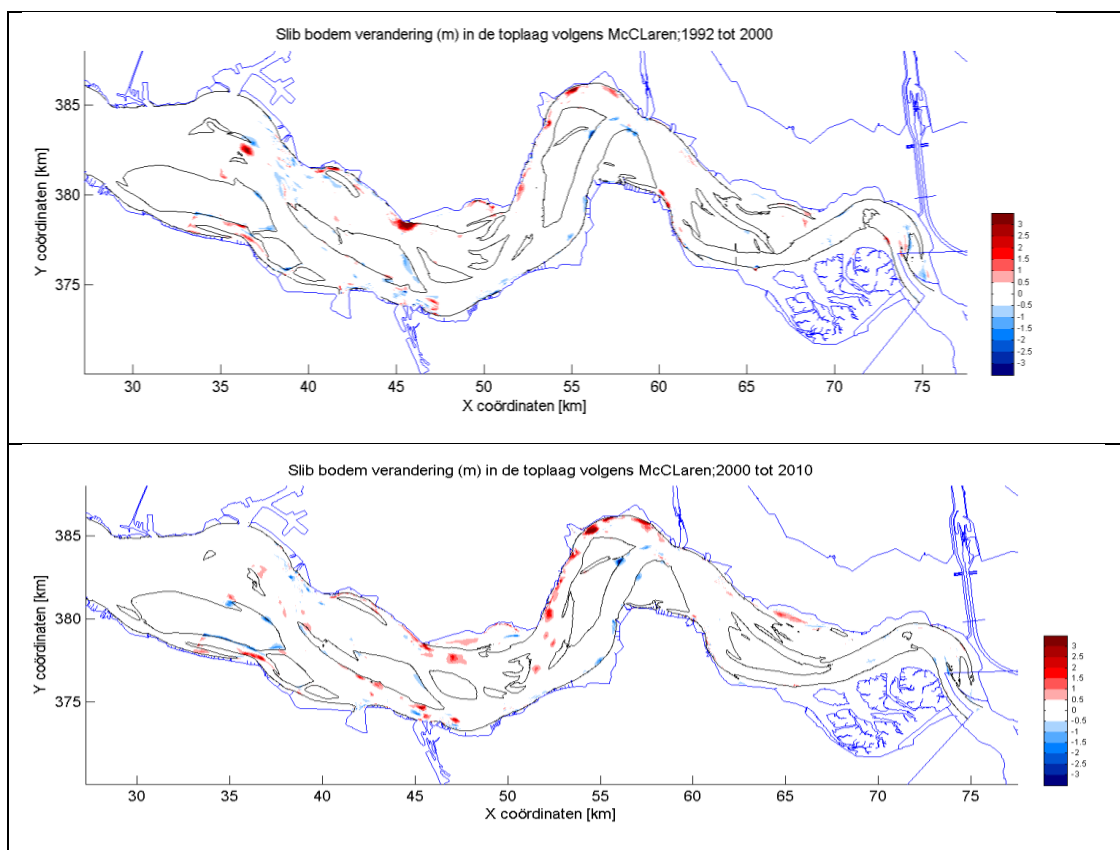
3.2 Berekening volumebijdrage slib

Voor de berekening van de volumebijdrage van het slib wordt gebruik gemaakt van de McLaren slibgehalte kartering. Deze kartering is geïnterpoleerd op de bodemontwikkeling per periode. Zodoende wordt per gridpunt een bodemhoogte verandering verkregen. Deze is te zien in Figuur 3.2. Er is een aantal aannames gedaan om tot een volumeschatting te kunnen komen:

1. Het gemeten slibpercentage is gelijk aan het volumepercentage. In werkelijkheid is het gemeten slibpercentage op basis van gewicht bepaald. Dit is een voorzichtige aanname, daar het soortelijk gewicht van slib kleiner is dan dat van zand;
2. De gemeten slibpercentages blijven over de diverse jaargangen gelijk;
3. Geen volume effecten door menging of ontmenging van zand en slib.

Verderop in dit hoofdstuk wordt ingegaan op de aannames 2 en 3.





Figuur 3.2: Slib bodem verandering in de toplaag voor drie tijdsperioden: 1980-1992; 1992-2000; 2000-2010

De volumebijdrage van slib wordt gedeeld door het aantal jaar van de gehele periode, zodat een gemiddelde bijdrage per jaar verkregen wordt. In Figuur 3.2 is te zien dat er vooral in het Middelgat aanzienlijke berging van slib plaatsvindt.

In Tabel 3.1 zijn de volumebijdragen van slib getoond per macrocel en voor de gehele Westerschelde. Deze volumes zijn niet gecorrigeerd voor menselijke ingrepen zoals baggeren, storten en zandwinnen. Opvallend is dat ondanks een negatieve totale sedimentbalans (er is niet gecorrigeerd voor zandwinnen) er een positieve volumebijdrage van het slib is in alle perioden. Er lijkt dus een vrij consistente positieve volumebijdrage te zijn van orde enkele honderdduizenden m^3 per jaar.

Tabel 3.1: Volumeverschil per jaar voor totaal en slib voor de periode 1980-1992, 1992-2000, 2000-2010

	1980-1992		1992-2000		2000-2010	
Macrocel	Totaal Mm ³ /jr	Slib Mm ³ /jr	Totaal Mm ³ /jr	Slib Mm ³ /jr	Totaal Mm ³ /jr	Slib Mm ³ /jr
1	0.04	0.01	0.22	0.01	-0.33	0
2	0.37	0.07	0.29	0.04	0.35	0.04
3	-1.42	-0.03	-0.84	0.02	0.63	0.26
4	0.55	0.01	-0.77	0.15	0.23	0.27
5	-0.29	0	-1.80	0.04	-1.20	0.05
6	-0.04	-0.01	-0.27	-0.04	-0.71	-0.05
7	-0.06	-0.02	-0.65	-0.08	-0.27	-0.04
Rest	0.37	0.07	0.07	0.01	0.07	0.04
Totaal McLaren kaart	-0.48	0.10	-3.76	0.15	-1.24	0.58

Let op dat deze getallen exclusief de sedimentatie van het Land van Saeftinghe zijn, die orde grootte 300.000 – 600.000 m³/jaar bedraagt (zie ook volgend hoofdstuk). Ook het transport van slib over de grens richting België is niet opgenomen in deze volumes.

3.3 Belang van het Middelgat als berging van slib

Uit Figuur 3.2 volgt al dat in het Middelgat behoorlijke sedimentatie van slib plaatsvindt. In Tabel 3.2 zijn de slib volumes voor het Middelgat bepaald. Hieruit volgt dat de sedimentatie sterk toegenomen is de laatste decennia, met dientengevolge ook een toename van de sedimentatie van slib. In de jaren 2000-2010 wordt een volumebijdrage van 420.000 m³/jaar aan slib bepaald. Dit is orde grootte 13-14% van de totale sedimentatie in het Middelgat. Voor de totale sedimentatie in de Westerschelde blijkt dat een groot deel in het Middelgat sedimenteert. Voor de drie perioden is dit 43%, 167% en 73% respectievelijk. De sedimentatie van meer dan 100% betekent dat in andere delen van de Westerschelde erosie van slib heeft plaatsgevonden, zodat de totale sedimentatie van slib in de Westerschelde dan kleiner is dan de sedimentatie in het Middelgat.

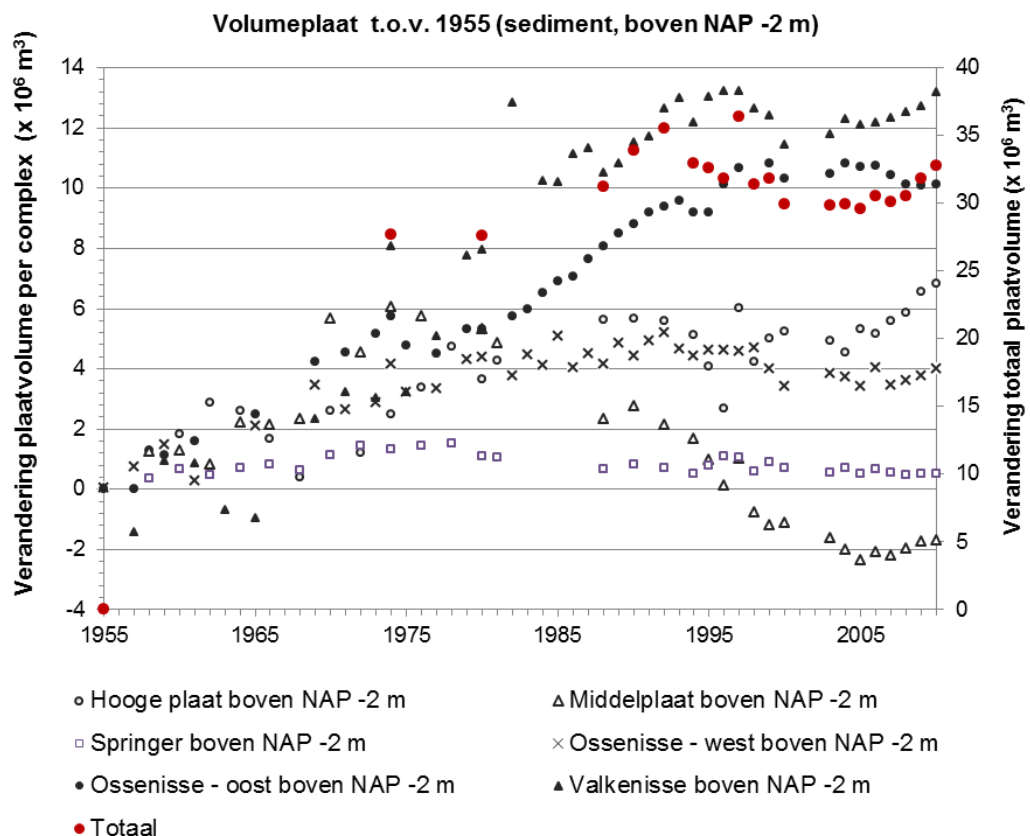
Manni (1986) merkte overigens al op dat het Middelgat van belang is voor de permanente berging van slib vanwege de hoge slibgehalten (zie paragraaf 2.2).

Tabel 3.2: Volumeverschil per jaar van Middelgat voor de periodes 1980-1992, 1992-2000, 2000-2010

Periode	1980-1992	1992-2000	2000-2010
Sed verandering M'gat / jaar	0.77 Mm ³	1.8 Mm ³	3.3 Mm ³
Slib verandering M'gat /jaar	0.04 Mm ³	0.25 Mm ³	0.42 Mm ³
% van sedimentatie M'gat is slib	5%	14%	13%
% van totale aanslibbing W'schelde	43% (0.1 Mm ³ /jr)	167% (0.15 Mm ³ /jr)	73% (0.58 Mm ³ /jr)

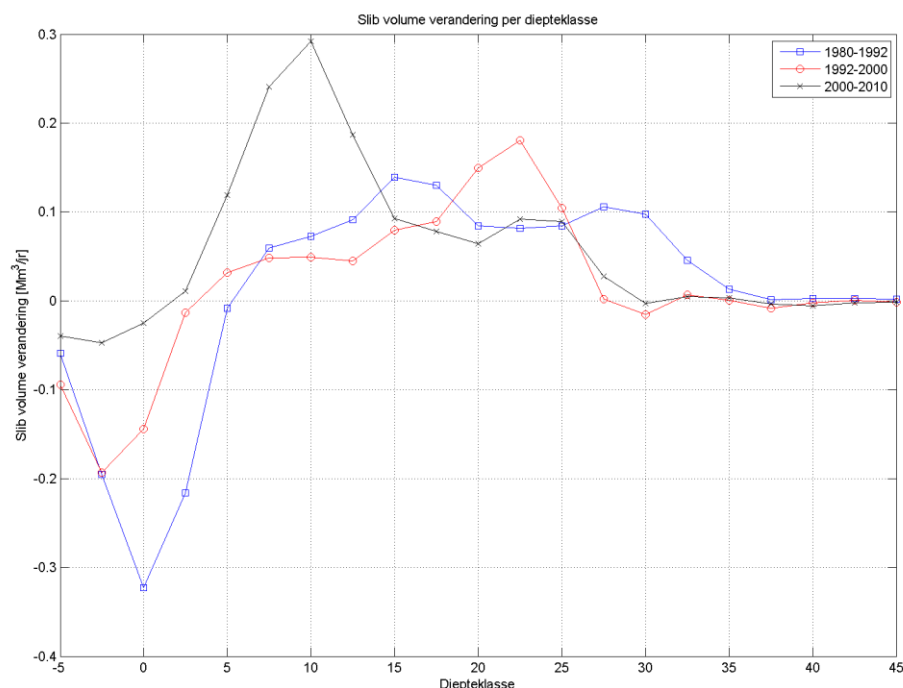
3.4 Slib verandering per diepteklasse

De volumeverandering van het slib is ook bepaald per diepteklasse. In Figuur 3.3 is te zien dat de sedimentatie van slib met name plaatsvindt in de diepere delen (<-5m NAP), dit is redelijk consistent over alle drie de perioden. Te zien is verder dat er erosie van slib plaatsvindt in de ondiepe delen (> -5m NAP). Vooral in de periode 1980-1992 en 1992-2000 is deze erosie aanzienlijk en compenseert bijna volledig de sedimentatie in de diepere delen. De grotere sedimentatie in de periode 2000-2010 is dus te verklaren door de mindere erosie van de ondiepe delen.



Figuur 3.4: Verandering plaatvolume per complex vanaf 1955 tot en met 2010

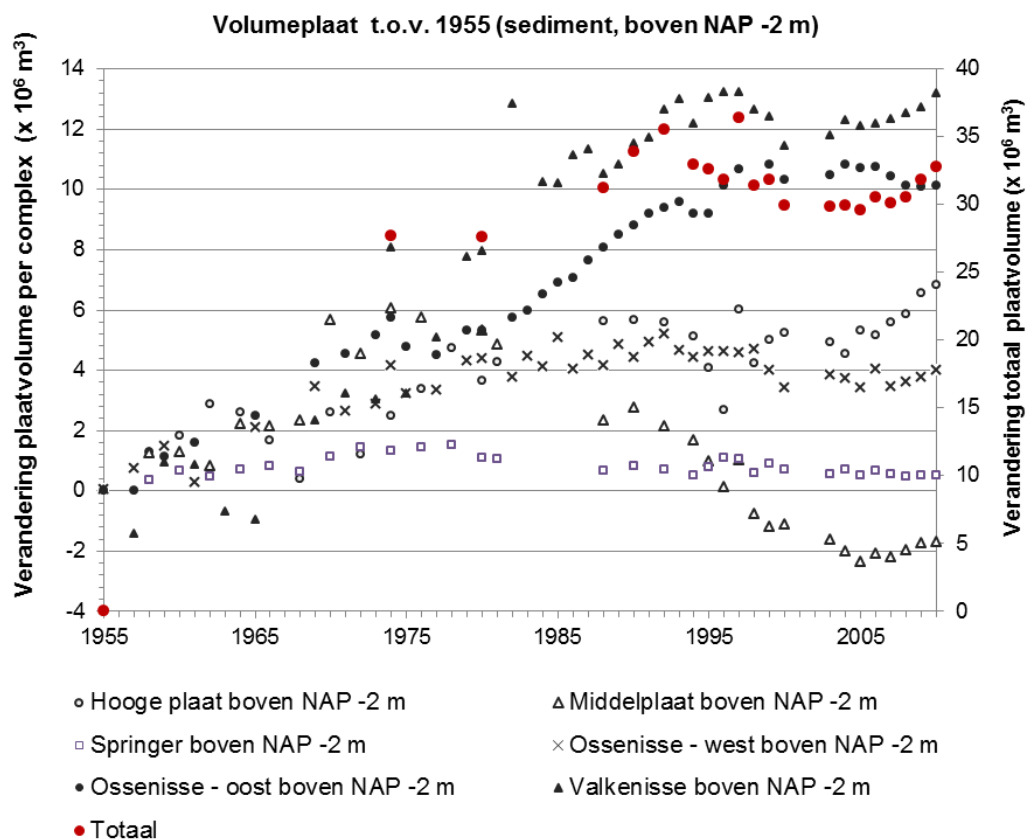
Tabel 3.3 vat de volumes samen voor diepe (<-5m NAP) en ondiepe (>-5m NAP) delen.



Figuur 3.3: Slib volume verandering per diepteklasse uitgesplitst voor de drie perioden

De vraag is of de aanname 2, dat het slibgehalte gelijk blijft over de tijd, opgaat voor het intergetijdengebied. De slibgehaltenes in de diepere delen zijn naar alle waarschijnlijkheid consistent over de tijd dan het intergetijdengebied. De stromingscondities waaronder het sediment in de geulen wordt afgezet zijn naar verwachting niet veel veranderd. De morfologie van de platen is echter wel duidelijk veranderd. Deze zijn over het algemeen hoger geworden en de kortsluitgeulen zijn grotendeels verdwenen. Het ligt voor de hand dat met het veranderen van de morfologie ook de stromingscondities en de afzetting van het sediment zijn veranderd. Ook zijn de condities op de platen gevoeliger voor de veranderingen (trendmatig en fluctuaties) in het getij, omdat deze op de platen relatief meer invloed hebben dan in de geulen. De slibgehaltegegevens van De Looft (Figuur 2.4) en McLaren (Figuur 2.5) laten beide een hoog slibgehalte zien in het Middelgat. Dit suggereert ook dat slib sedimentatie in de diepe delen vrij consistent is, maar dat de erosie op het intergetijdengebied minder goed berekend kan worden door een grotere variatie over de tijd. Omdat juist de diepe delen de belangrijkste netto sedimentatiegebieden zijn voor de sedimentbalans, lijkt de aanname van een in de tijd vast percentage slib gerechtvaardigd.

De erosie van slib in ondiepe delen lijkt intuïtief fout te zijn, aangezien de platen naar verwachting opgehoogd zijn en dat slib een belangrijke rol daarin gespeeld heeft. Echter de platen vormen geen continue sink, zie Figuur 3.4. Het volume aan sediment dat in de periode 1955-2010 op platen is geborgen is net zo groot als het volume sediment dat in het Vaarwater langs Hoofdplaat is geborgen.



Figuur 3.4: Verandering plaatvolume per complex vanaf 1955 tot en met 2010

Tabel 3.3: Volumeverschil per jaar voor diep (<-5m) en ondiep (>-5m) voor totaal en slib voor de periode 1980-1992, 1992-2000, 2000-2010

		1980-1992	1992-2000	2000-2010
TOTAAL	Volumeverschil intergetijden (>-5m)	-6.31	-5.84	-3.84
	Volumeverschil diep water (<-5m)	5.84	2.05	2.60
	Netto	-0.48	-3.78	-1.24
SLIB	Volumeverschil intergetijden (>-5m)	-0.38	-0.24	-0.07
	Volumeverschil diep water (<-5m)	0.48	0.39	0.64
	Netto	0.10	0.15	0.58

3.5 Geen volume effecten door menging of ontmenging van zand en slib?

Het volume effect van het mengen van zand en slib heeft betrekking op de wijze waarop slibdeeltjes tussen de zandkorrels kunnen worden geborgen. Rapport G-2 (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013d) waar deze rapportage op aansluit, bevat een rekenvoorbeeld dat dit effect illustreert en dat hieronder is overgenomen.

Een effect dat samenhangt met de pakking/stapeling van het sediment is dat de dichtheid van een mengsel zand en fijn sediment (niet lineair) samenhangt met het percentage fijn sediment in het mengsel. In de literatuur zijn verschillende formules voorhanden die de relatie tussen de dichtheid

ρ_{dry} en het gewichtspercentage fijn sediment p_{fijn} beschrijven, waarbij hier ter illustratie die van Mulder (1995) is weergegeven:

$$\rho_{\text{dry}} = 1550 - 17,5 \times p_{\text{fijn}} + 0.065 \times p_{\text{fijn}}^2$$

In het rekenvoorbeeld is beschikbaar 1 m³ puur zand en met 1m³ puur fijn sediment. Ontmengd is dat samen 2 m³ sediment.

Volgens de bovenstaande formule is het gewicht daarvan:

1 m³ zand, met $P_{\text{fijn}} = 0\%$ heeft drooggewicht van 1550kg;

1 m³ fijn sediment, met $P_{\text{fijn}} = 100\%$ heeft een drooggewicht van 450kg.

Het zand en het fijn sediment met een gezamenlijk gewicht van 2000 kg mengsel wordt nu goed gemengd. Het mengsel heeft een gewichtspercentage van $P_{\text{fijn}} = 22,5\%$ (=450 kg/2000kg). Invullen van dat percentage in de bovenstaande formule levert een droge dichtheid van het mengsel van 1181 kg/m³.

Nu kan het volume van het mengsel worden berekend door het totale gewicht van 2000 kg van het mengsel te delen door de dichtheid van 1181 kg/m³. Dat geeft een volume van 1,69 m³ voor het mengsel.

Los van elkaar is er dus sprake van een volume van 2m³, terwijl gemengd sprake is van een volume van 1,69 m³. De verklaring voor het verschil is dat het fijne sediment deels tussen de zandkorrels terechtkomt en daar poriënruimte opvult. Met dit extreme voorbeeld is een volumeverschil van 15% gemoeid. Maar ook kleinere verschillen in menging van het sediment kunnen verschillen opleveren in de volumes.

In hoeverre menging van zand en slib bepalend is voor het sedimentvolume in de Westerschelde is niet vast te stellen zonder kennis van de mate van menging van het sediment. Het zand en slib in de bodem van de Westerschelde is namelijk niet noodzakelijkerwijze (goed) gemengd. Veel getijdeafzettingen waarin zand en slib aanwezig zijn, bestaan uit discrete lagen van zand en slib, bijvoorbeeld in de vorm van “flasers en linsen” en “tidal bundles”. Dit soort afzettingen zijn ook in de Westerschelde gerapporteerd. Menging van zand en slib treedt vooral op door de gravende activiteiten van organismen (bioturbatie).

Voor de aanname van ‘geen volume-effecten door ontmenging’, is het niet noodzakelijk om te weten of en hoe de menging plaatsvindt. Van belang voor eventuele volume-effecten is alleen of er sprake is van *verandering* in de menging. Een verandering in de menging is waarschijnlijk als de omstandigheden waaronder het sediment zijn afgezet, zijn veranderd. Voor veranderingen in de afzettingscondities gelden dezelfde argumenten als hierboven zijn gehanteerd bij de geobserveerde verschillen in de sedimentatie per diepteklasse. In de geulen is het minder waarschijnlijk dat de afzettingscondities en daarmee de menging is veranderd. Op de platen is het zeker niet onmogelijk dat de menging is veranderd. Omdat de belangrijke netto sedimentatiegebieden in de geulen worden aangetroffen lijkt de aanname dat volume-effecten van (ontmenging) worden genegeerd acceptabel. Een verdere onderbouwing hiervan, bijvoorbeeld met aanvullende ongestoorde bodemonsters (kernen) uit de belangrijke netto sedimentatiegebieden, waarin zowel percentages fijn sediment als mate van menging kunnen worden bepaald, zijn wenselijk.

3.6

Conclusies

Uit de eerste berekeningen van een volumebijdrage voor slib komt naar voren dat, ondanks een negatieve trend voor de totale sedimentbalans, een positieve sedimentatie van slib gevonden wordt in de Westerschelde. Dit slib is vooral afgezet in secundaire geulen zoals het Middelgat. Eindconclusie is dat het logisch lijkt dat er in de gehele Westerschelde enkele 100.000 m³ slib /jaar permanent geborgen wordt (exclusief Land van Saeftinghe).

4 VAN SEDIMENTBALANS NAAR ZAND- EN SLIBBALANS

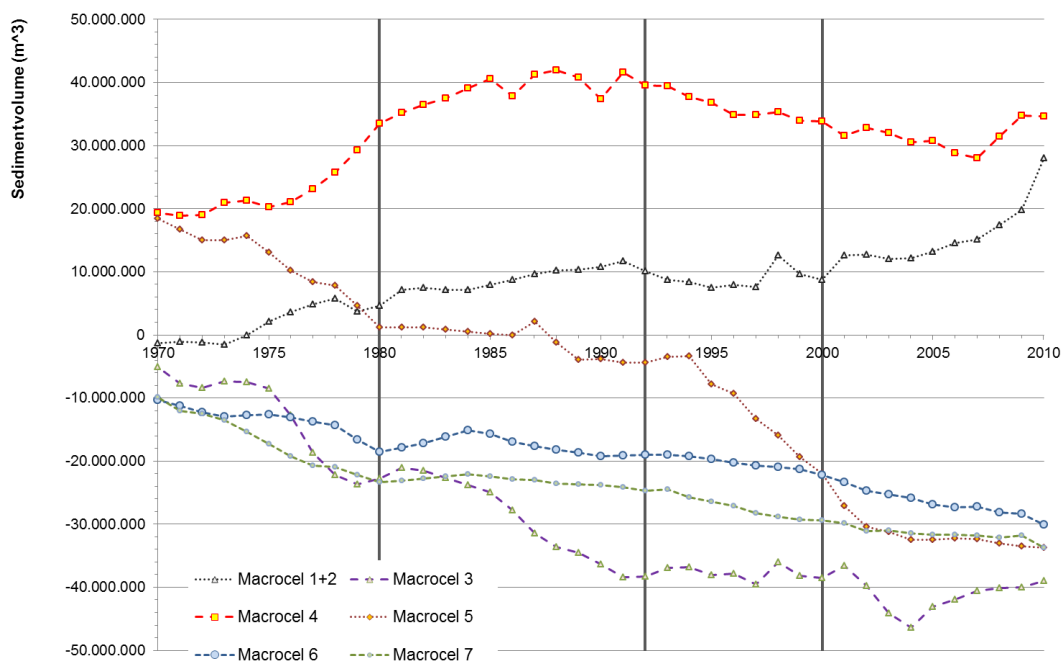
4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de sedimentbalans van de Westerschelde gesplitst in een zand- en slibbalans. Als eerste wordt gekeken naar de totale sedimentbalans. Voor een sedimentbalans is het nodig om getallen te hebben voor de:

- Veranderingen in het sedimentvolume;
- Ingrepen (onttrekking door baggeren en zandwinning en de stortingen);
- Randvoorwaarden: de transporten naar de gebieden die buiten de balans liggen.

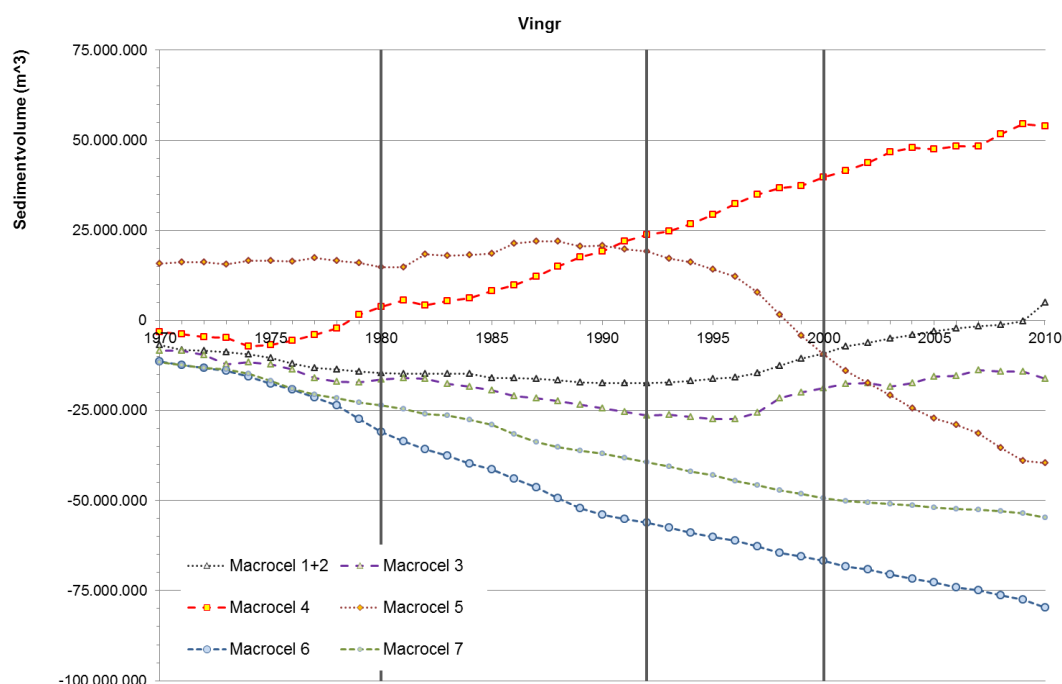
Omdat de balans wordt opgesteld per macrocel, moeten de getallen ook per macrocel beschikbaar zijn.

In het voorgaande hoofdstuk is weergegeven hoe de sedimentvolumes zijn bepaald op basis van de verschillen tussen een aantal jaren (1980-1992; 1992-2000; 2000-2010). Dit is noodzakelijk voor het bepalen van de bijdrage van slib aan de totale sedimentatie. Maar in deze bepalingen zijn de gegevens van de tussenliggende jaren niet betrokken, zodat de waarde van de twee jaren (met de onnauwkeurigheden die er bij horen) zeer bepalend worden voor de uitkomsten. In de grafiek in figuur 4.1 zijn de sedimentvolumes per macrocel weergegeven en hierin zijn ook de jaren 1980, 1992 en 2000 gemarkeerd. Door met een trend over een langere periode te werken worden de tussenliggende jaren betrokken bij het bepalen van de sedimentatievolumes.



Figuur 4.1 Grafiek met de ontwikkeling van het sedimentvolume per macrocel voor de periode 1970-2010 (bron Rijkswaterstaat Zandbalans).

Voor de ingreepvolumes geldt eenzelfde opmerking als voor de sedimentvolumes: werken met de verschillen van individuele jaren betekent dat de tussenliggende jaren buiten de beschouwing blijven. Bij het bepalen van trends worden de tussenliggende jaren wel in de beschouwing betrokken. In de grafiek in figuur 4.2 zijn de cumulatieve ingreepvolumes weergegeven.



Figuur 4.2 Grafiek met de cumulatieve ingreepvolumes sinds 1955 per macrocel voor de periode 1970-2010 (bron Rijkswaterstaat Zandbalans).

In tabel 4.1 zijn de trends in de sedimentatie weergegeven die zijn bepaald voor de periode van 1994 tot 2010, evenals de ingreepvolumes. Deze periode is gekozen om aan te sluiten bij de periode die gebruikt is in rapport G2 (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013d). Het verschil tussen de ontwikkeling van het sedimentvolume en het ingreepvolume is de netto volumeverandering die de macrocel doormaakt, ook dit volume staat in tabel 4.1.

Tabel 4.1 Trends in de ontwikkeling van de sedimentvolumes en het ingreepvolume voor de periode van 1994 - 2010.

$\times 10^6 \text{ m}^3 / \text{jaar}$	Macrocel 1+2	Macrocel 3	Macrocel 4	Macrocel 5	Macrocel 6	Macrocel 7
Sediment-volume [1]	0,82	-0,28	-0,39	-1,99	-0,66	-0,45
Ingrepen volume [2]	1,24	0,85	1,7	-3,7	-1,26	-0,77
Netto volume [1]-[2]	-0,42	-1,13	-2,09	1,71	0,60	0,32

De randen van de sedimentbalans zijn de transporten naar het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde en hiervoor moeten randvoorwaarden bekend zijn. Het Land van Saeftinghe fungeert als een netto sedimentatiegebied. De jaarlijkse sedimentatievolumes zijn gebaseerd op historische metingen van de hoogte en de sedimentatie. Recente hoogtemetingen zijn niet bruikbaar gebleken voor het bepalen van de sedimentatie in het Land van Saeftinghe. De gehanteerde waarden variëren van 0,3 tot $0,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

In de Haecon (2006) sedimentbalans, waarin de dieptemetingen en ingreepvolumes in de Zeeschelde zijn opgenomen, zijn ook transporten van sediment van de Westerschelde naar de Zeeschelde

berekend. Voor de periode na 2004 worden waarden van $0,675 \times 10^6 \text{ m}^3$ / jaar gebruikt (Rijkswaterstaat Zandbalans). Gemiddeld over de periode van 1994 tot 2010 wordt uitgegaan van een transport naar de Zeeschelde en het Land van Saeftinghe van $1,23 \times 10^6 \text{ m}^3$ / jaar.

4.2 Uitsplitsing zand en slib

In de sedimentvolumes uit de voorgaande paragraaf is nog geen onderscheid gemaakt naar de bijdragen van zand en slib. Bij de ingrepen is het uitgangspunt dat deze geheel uit zand bestaan. Dat is in ieder geval juist voor de onttrekkingen bij zandwinning. Voor de gebaggerde en gestorte volumes zal in deze balans nog geen onderscheid worden gemaakt, hoewel sprake is van specie met meer en minder fijn sediment.

De berekeningen met de McLaren-kaarten met de percentages fijn sediment en de verschillen over de drie perioden in hoofdstuk 3 leveren waarden voor de sedimentatie van slib en sediment. Deze waarden zijn weergegeven in onderstaande tabel 4.2. De belangrijkste constatering op basis van deze tabel is dat grote verschillen zichtbaar zijn in:

1. De berekende totale sedimentatie per macrocel voor de drie periodes;
2. De bijdrage van slib aan de sedimentatie per macrocel.

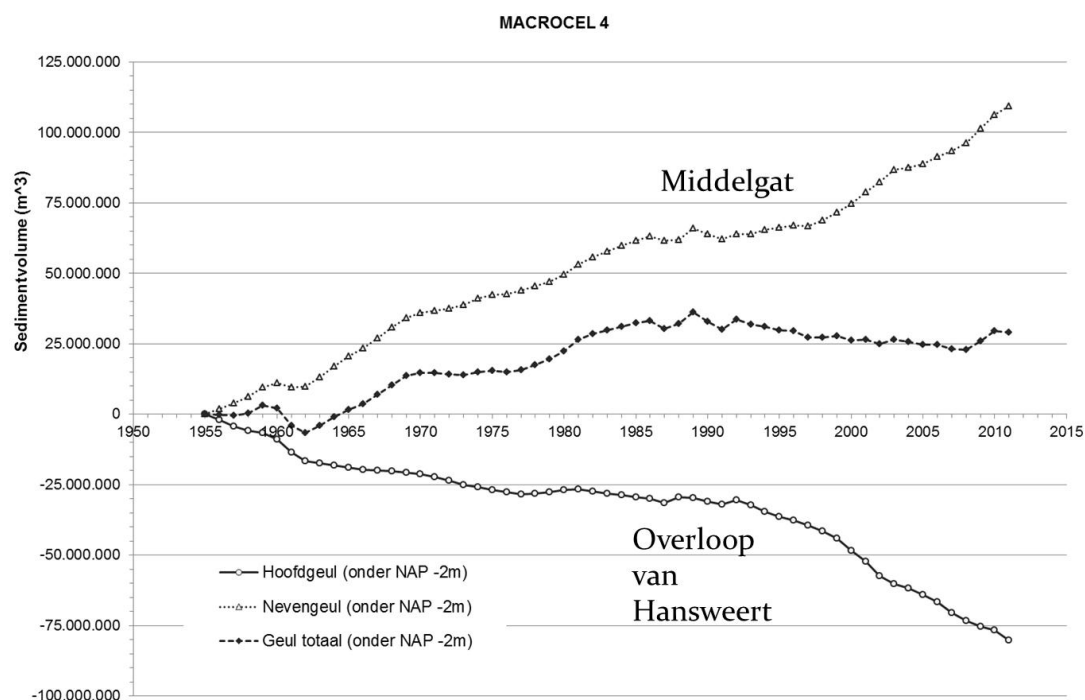
De uitzonderingen op de grote verschillen wordt gevormd door de mesocel 2, waarbij slib altijd bijdraagt aan de sedimentatie en door de macrocel 6 en 7 waar de erosie van slib altijd bijdraagt aan de sedimentafname. Als in macrocel 4 het Middelgat als sedimentatiegebied apart wordt beschouwd (figuur 4.3), blijkt daar slib, net als in mesocel 2, een bijdrage aan de sedimentatie te leveren. Het Middelgat vertoont een behoorlijk constante sedimentatie, zeker als het drempelgebied met de Everingen buiten de beschouwing wordt gelaten. Voor de Westerschelde als geheel blijkt slib voor alle drie de periodes netto gesedimenteerd te zijn, terwijl als geheel de sedimentafname overheerst.

Tabel 4.2 Berekende verschil volumes (totaal) en slibvolumes voor drie periodes.

	1980 tot 1992			1992 tot 2000			2000 tot 2010		
	Totaal	Slib	Slib/ totaal	Totaal	Slib	Slib/ totaal	Totaal	Slib	Slib/ totaal
MC 1	0,042	0,008	19,6%	0,217	0,014	6,6%	-0,331	-0,002	0,6%
MC 2	0,368	0,073	19,7%	0,289	0,044	15,3%	0,347	0,039	11,2%
MC 3	-1,42	-0,034	2,4%	-0,842	0,021	-2,5%	0,626	0,264	42,1%
MC 4	0,554	0,009	1,6%	-0,768	0,150	-19,5%	0,227	0,272	119,8%
Ossenissee ²	0,222	-0,006	-2,6%	-0,037	-0,042	113,9%	0,064	0,015	23,9%
MC 5	-0,288	-0,001	0,4%	-1,802	0,039	-2,2%	-1,204	0,051	-4,2%
MC 6	-0,044	-0,006	12,9%	-0,270	-0,044	16,1%	-0,714	-0,046	6,5%
MC 7	-0,061	-0,018	29,6%	-0,651	-0,080	12,3%	-0,267	-0,040	14,9%
Macrocel	-0,849	0,031	-3,6%	-3,826	0,145	-3,8%	-1,158	0,537	-46,4%
McLaren kaart	-0,477	0,097	-20,3%	-3,757	0,153	-4,1%	-1,241	0,575	-46,4%
Middelgat	0,771	0,042	5,4%	1,781	0,255	14,3%	3,275	0,423	12,9%

² In de vakindeling van de Rijkswaterstaat Zandbalans zitten twee vakken (Plaat van Ossenissee en Put van Hansweert) tussen macrocel 4 en 5, die geen onderdeel zijn van de balans. In de balans zijn de vakken buiten beschouwing gelaten.

In de volgende paragraaf zal worden verduidelijkt waarom de grote verschillen optreden in de berekende slibsedimentatie. De grote verschillen in de totale volumeveranderingen hangen onder meer samen met het optreden van trendbreuken in de ontwikkelingen, zoals zichtbaar in figuur 4.1.



Figuur 4.3 Grafiek volume ontwikkeling sinds 1955 van de twee geulen in macrocel 4 (bron Rijkswaterstaat Zandbalans).

Het is duidelijk dat de getallen in tabel 4.2 niet zonder meer bruikbare getallen opleveren om toe te passen in een zand- en slibbalans. Op basis van de kennis van het sedimenterende en eroderende Westerschelde systeem wordt met behulp van de getallen in tabel 4.2 een schatting gemaakt van de bijdrage van slib.

- Macrocel 1. Geen bijdrage slib aan de sedimentatie en de erosie.
- Mesocel 2. Constante sedimentatie, uitgangspunt is een vaste procentuele bijdrage van slib van 10%.
- Macrocel 3. Geen bijdrage slib aan de sedimentatie en de erosie.
- Macrocel 4. Constante sedimentatie in het Middelgat van $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$, uitgangspunt is een vaste procentuele bijdrage van slib van 10%.
- Macrocel 5. Geen bijdrage slib aan de sedimentatie en de erosie.
- Macrocel 6 & 7. Constante erosie sedimentatie, uitgangspunt is een vaste procentuele bijdrage van slib van 10%.

Als randvoorwaarde voor het transport naar het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde wordt aangenomen dat van de jaarlijkse transport van $1,23 \times 10^6 \text{ m}^3$ het volume slib de helft, oftewel $0,615 \times 10^6 \text{ m}^3$ bedraagt. Let op dat het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde hier tezamen als één randvoorwaarde beschouwd worden. Het land van Saeftinghe wordt gevoed door macrocel 5 en 6, , maar is in deze analyse toegevoegd aan de bovenstroomse randvoorwaarde van de Zeeschelde (bovenstrooms van macrocel 7). De grootte van de transporten door MC5, 6 en 7 veranderen weliswaar, maar niet de richtingen. Door deze aanpak wordt het beeld eenvoudiger en is makkelijker

uit te leggen. Bovendien komt het overeen met de aanpak zoals die in andere balansen gehanteerd is.

Om te komen tot de volumes aan zand en slib (weergegeven in tabel 4.3) wordt van de totale volumeverandering per jaar de bijdrage van het slib afgetrokken:

$$\Delta V_{\text{zand}} = \Delta V_{\text{totaal}} - \Delta V_{\text{slib}}$$

Tabel 4.3 Gehanteerde volumes zand en slib in de sedimentbalans.

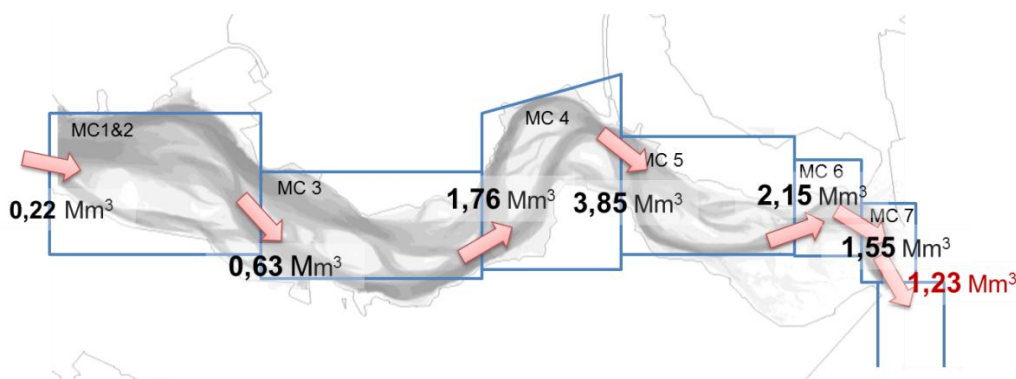
X 10 ⁶ m ³ / jaar	Macrocel 1+2	Macrocel 3	Macrocel 4	Macrocel 5	Macrocel 6	Macrocel 7	Naar Saftinghe & Zeeschelde
Sediment-volume	0,82	-0,28	-0,39	-1,99	-0,66	-0,45	1,23
Slib-volume	0,064	0	0,17	0	-0,066	-0,045	0,615
Zand-volume	0,757	-0,28	-0,56	-1,99	-0,60	-0,41	0,615
Ingrepen volume	1,24	0,85	1,70	-3,70	-1,26	-0,77	Nvt

4.3

Balansen

De getallen in tabel 4.3 zijn gebruikt voor het berekenen van een sedimentbalans en voor het uitsplitsen in een zand- en slibbalans. De berekening van deze sedimentbalans wordt van oost naar west uitgevoerd. Voor iedere macrocel wordt de netto volume verandering bepaald door van de ontwikkeling van het sedimentvolume het ingrepen volume af te trekken (zie tabel 4.1). Het transport over de westelijke rand wordt dan berekend door van de netto volumeverandering het transport over de oostelijke rand af te trekken. Voor de zand- en slibbalans worden deze berekeningen voor zowel het zand als het slib uitgevoerd.

In de onderstaande figuur 4.3 is het resultaat van de totale sedimentbalansberekeningen weergegeven. De transporten staan allemaal gericht van west naar oost.

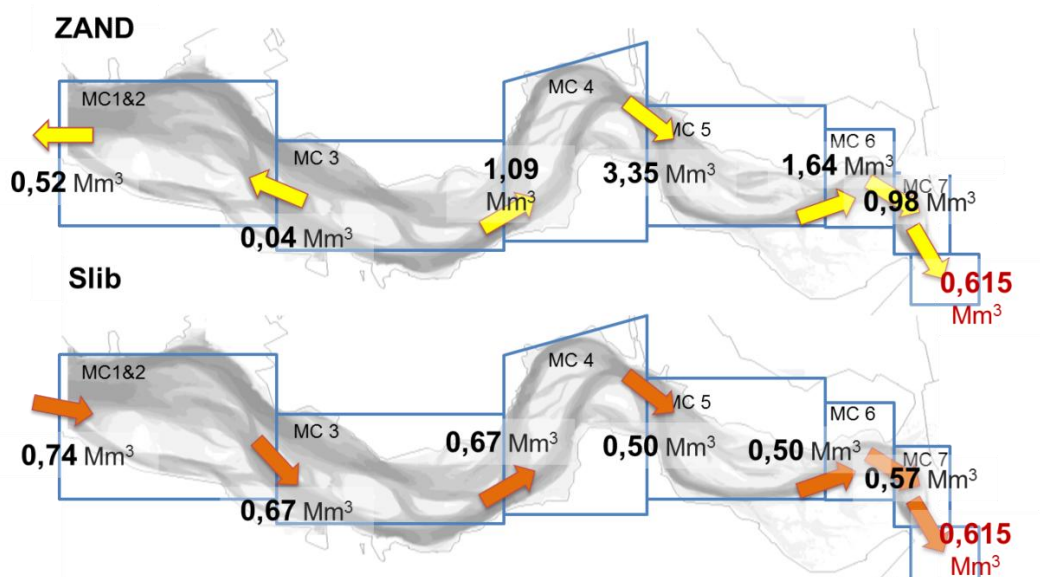


Figuur 4.4 Berekende transporten uit de sedimentbalans op basis van de getallen in tabel 4.3.

De resultaten van de zand- en slibbalans staan in figuur 4.4. Het belangrijkste verschil tussen transporten in de zand- en slibbalans en de sedimentbalans, is dat in het zandtransport de transporten van macrocel 1 en 3 naar de monding zijn gericht. Het slibtransport is van west naar oost gericht. Bedenk hierbij dat de omvang van de berekende transporten, evenals de richting ervan,

gevoelig zijn voor de randvoorwaarden voor het transport naar het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde. In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan.

Berekende **transporten per jaar** op basis van Volume Netto trend 1994-2010



Figuur 4.4 Berekende transporten uit de zand- en slibbalans op basis van de getallen in tabel 4.3.

4.4 Onzekerheden

4.4.1 Omvang van de slibsedimentatie

De berekende bijdrage van slib aan de sedimentatie is afhankelijk van:

1. De gebruikte slibpercentages;
2. De gebruikte verschilkaart.

De gebruikte slibpercentages zijn gebaseerd op de McLaren bemonstering en analyse. Bemonstering is een momentopname van de toplaag van het sediment. De wijze van voorbereiden en analyseren van de monsters blijkt ook grote invloed te hebben op de uitkomsten (Zwarts, 2004). Vergelijking met de schaarse andere gegevens over de sedimentsamenstelling laat zien dat er inderdaad grote verschillen optreden in de percentages.

De omvang en locaties van de erosie en sedimentatie in de verschilkaarten is afhankelijk van de gebruikte jaren. Op sommige plekken wordt vrijwel altijd sedimentatie (Vaarwater langs Hoofdplaat, Middelgat), dan wel erosie (Schaar van de Noord, hoofdgeul macrocel 6 en 7) waargenomen, maar op andere plekken varieert dit. De locaties waar de ontwikkeling varieert en waar de slibpercentages relatief hoog zijn, leveren grote variaties in de berekende bijdrage van slib aan de sedimentatie dan wel erosie. Dit verklaart de grote verschillen die optreden in sommige van de macrocellen in tabel 4.2.

De zand- en slibbalans in dit rapport heeft betrekking op de uitwisseling van zand en slib over perioden van tien tot tientallen jaren. De fluctuaties in de berging dan wel het vrijgeven van slib die ontstaan door de tijdelijke sedimentatie en erosie zijn daarvoor niet van belang, omdat deze de transporteren tijdelijk moduleren. De trendmatige ontwikkeling in de sedimentatie en de erosie

moet daarom los worden beschouwd van de fluctuaties. Vooralsnog gebeurt dat op basis van expertkennis van de putten en bronnen (sinks, sources) van slib.

4.4.2 Diep en ondiep

In aanvulling op de weergaven van de erosie en sedimentatie per macrocel (in tabel 4.3) is een onderverdeling gemaakt naar de diepte (tabel 4.4). In alle perioden treedt sedimentatie van slib op in de diepe delen (dieper dan -5m NAP) en erosie van slib in de ondiepe delen (boven -5m NAP). Het verschil tussen de 3 perioden wordt vooral bepaald door het ondiep water en het intergetijdengebied (boven -5m NAP):

- In 1980-1992 is $0.38 \times 10^6 \text{ m}^3$ slib per jaar geërodeerd uit de ondiepe delen, terwijl $0.48 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar aan slib sedimenteert in de diepe delen, zodat er sprake is van een netto sedimentatie van slib van $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.
- In 1992-2000 is $0.24 \times 10^6 \text{ m}^3$ slib per jaar geërodeerd uit de ondiepe delen, terwijl $0.39 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar aan slib sedimenteert in de diepe geulen, zodat er sprake is van een netto sedimentatie van slib van $0.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.
- In 2000-2010 vindt beperkte erosie van slib plaats uit de ondiepe delen van $0.07 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar, terwijl de sedimentatie van slib in de diepe delen groot is met $0.64 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar, zodat er sprake is van een netto sedimentatie van slib van netto $0.58 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.

Tabel 4.4 Berekende verschil volumes (totaal) en slibvolumes per diepte zone voor drie periodes.

In 10^6 m^3 per jaar		1980-1992	1992-2000	2000-2010
Totaal volume	Volumeverschil ondiepe delen (>-5m)	-6.31	-5.84	-3.84
	Volumeverschil diep water (<-5m)	5.84	2.05	2.60
	Netto	-0.48	-3.78	-1.24
Slib	Volumeverschil ondiepe delen (>-5m) (percentage van totaal tussen haakjes)	-0.38 (6,0%)	-0.24 (4,1%)	-0.07 (1,8%)
	Volumeverschil diep water (<-5m) (percentage van totaal tussen haakjes)	0.48 (8,2%)	0.39 (19,0%)	0.64 (24,6%)
	Netto	0.10	0.15	0.58

De bijdrage van slib aan de erosie van de ondiepe delen is met percentages van 1,8 tot 6,0% relatief laag ten opzichte van de bijdrage van slib aan de sedimentatie in de diepe delen, die van 8,2 tot 24,6% varieert.

De sedimentatie in de diepe delen vindt relatief constant in de tijd plaats, in het Vaarwater langs Hoofdplaat en in het Middelgat. De sedimentatie en erosie door het getij verlopen in de beide geulen waarschijnlijk al jaren achtereenvolgend op een vergelijkbare wijze, omdat er weinig veranderingen zijn opgetreden in de randvoorwaarden voor deze processen. Het ligt daarom voor de hand dat in deze geulen ook een relatief constante sedimentatie van slib heeft plaatsgevonden.

De erosie in de ondiepe delen zegt niets over het type sediment dat wordt geërodeerd. Dit sediment kan onder allerlei omstandigheden zijn afgezet, omdat de afzetting in het (verre) verleden heeft plaatsgevonden. Afhankelijk van het type sediment (oude afzettingen van platen en slikken die rijk zijn aan slib, zandige afzettingen van kortsluitgeulen) komt meer of minder slib vrij bij het aansnijden ervan. Overigens geldt ook bij de erosie van de diepere delen dat het vrijkomen van slib afhankelijk is van de samenstelling van de aangesneden lagen.

Samenvattend wordt vastgesteld dat de sedimentatie in het Vaarwater langs Hoofdplaat en het Middelgat relatief constant in de tijd verloopt en dat ook de sedimentatie van slib in deze geulen

naar verwachting constant in de tijd plaatsvindt. Dit is de rechtvaardiging voor het opnemen van constante sedimentatie van slib voor deze gebieden in de sedimentbalans (tabel 4.3). De constante erosie van slib in macrocel 6 en 7, zoals die is opgenomen in de sedimentbalans is gebaseerd op de getallen in tabel 4.2. De doorgaande erosie die in deze macrocellen in de geulen plaatsvindt, snijdt blijkbaar vrij consequent door afzettingen waaruit slib vrij komt. Het negeren van de erosie en de sedimentatie van slib in de andere macrocellen is gebaseerd op het ontbreken van bronnen en putten van slib die constant in de tijd aanwezig zijn. De tijdelijk grotere en kleinere bijdragen van de ondiepe delen worden vooralsnog beschouwd als tijdelijke fluctuaties.

4.4.3 Randvoorwaarden

De volumes aan zand en slib die als randvoorwaarden aan de oostelijke rand van de sedimentbalans worden opgelegd zijn zeer bepalend voor de berekende transporten in de Westerschelde. Alle zand en slib die naar de Zeeschelde en het land van Saeftinghe wordt getransporteerd moet door de Westerschelde worden aangevoerd. Zowel het totale volume dat over de randen wordt getransporteerd als de onderverdeling in zand en slib zijn geen 'harde' getallen. De getallen die voor Saeftinghe worden genoemd voor de totale sedimentatie variëren met een factor twee, van 0,3 tot $0,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Hoeveel zand in verhouding tot slib wordt afgezet is al helemaal niet duidelijk. Het is daarbij belangrijk om te bedenken dat Saeftinghe niet volledig uit (slibrijk) schor bestaat, maar ook een belangrijk areaal (zandrijk) slik herbergt, in de vorm van de toevoergeulen.

Voor de Zeeschelde geldt dat de berekende totale transporten afhangen van de bodemligging en de gerapporteerde onttrekkingsvolumes. De betrouwbaarheid hiervan is niet bekend. Omdat geen actuele zand- en slibbalans van de Zeeschelde beschikbaar is, is er geen recente uitspraak over de bijdrage van zand en slib aan het totale volume.

Om de impact van andere randvoorwaarden te verduidelijken is een zand- en slibbalans berekend met aangepaste verhoudingen voor het transport van zand en slib over de rand naar het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde. Aangenomen zijn een zandtransport van $0,33 \times 10^6 \text{ m}^3$ en een slibtransport van $0,9 \times 10^6 \text{ m}^3$, zodat het totaal van zand en slib nog steeds $1,23 \times 10^6 \text{ m}^3$ bedraagt. Ook de omgekeerde verhouding is doorgerekend. De belangrijkste verschillen met de oorspronkelijke balans van een balans met een zandtransport van $0,33 \times 10^6 \text{ m}^3$ en een slibtransport van $0,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ zijn:

1. Grotere transporten van slib van west naar oost door de Westerschelde;
2. Kleinere transporten van zand door de Westerschelde;
3. Grotere westelijk gerichte zand transporten vanaf macrocel 3.

De belangrijkste verschillen met de oorspronkelijke balans van een balans met een zandtransport van $0,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ en een slibtransport van $0,33 \times 10^6 \text{ m}^3$ zijn:

1. Kleinere transporten van slib van west naar oost door de Westerschelde;
2. Grotere transporten van zand door de Westerschelde;
3. Verschuiven van het omslagpunt van westelijk gerichte naar oostelijk gerichte zand transporten naar de overgang van macrocel 1 en 3. De export van zand bij de monding verminderd, maar de netto richting van het zandtransport is nog steeds zeewaarts gericht.

4.5 Discussie en conclusies

De uitkomsten van de zand- en slibbalans laten patronen in de transporten zien die wezenlijk anders zijn dan de transporten zoals die volgen uit een sedimentbalans. De omvang van de berekende zand- en slibtransporten is afhankelijk van de gehanteerde slibsedimentatie en erosie en de randvoorwaarden voor de transporten naar het land van Saeftinghe en de Zeeschelde. Omdat de gegevens voor het bepalen van de slibsedimentatie en erosie en de randvoorwaarden beperkt zijn,

moet rekening worden gehouden met een grote spreiding in de uitkomsten. Toch kan geconcludeerd worden dat:

1. Slib hoogstwaarschijnlijk een netto positieve bijdrage levert aan de sedimentbalans van het Schelde-estuarium;
2. Wat er aan slib sedimenteert in de Westerschelde, in het land van Saeftinghe en in de Zeeschelde niet in de vorm van zand wordt afgezet, zodat:
3. Daarmee de omvang en het patroon van de zandtransporten anders verloopt dan van het slib.
4. Zand exporteert hoogstwaarschijnlijk ter hoogte van de monding.

5 UITKOMSTEN ZAND EN SLIB MODELLEN

5.1 Inleiding

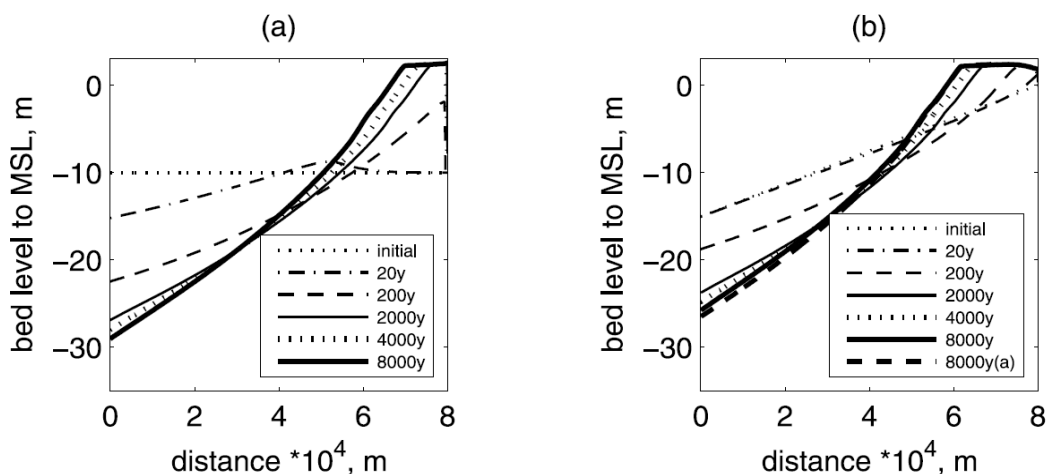
Uit de uitgesplitste zand- en slibbalans van het vorige hoofdstuk komt naar voren dat het westen van de Westerschelde zand lijkt te exporteren en ergens rond macrocel 2 of 3 een verandering plaatsvindt naar landwaarts transport van zand, afhankelijk van de aannames. Slib lijkt consistent te importeren. In dit hoofdstuk wordt de zand- en slibbalans uit het voorgaande hoofdstuk vergeleken met de bestaande zand- en slibmodellen van het Schelde estuarium.

5.2 Zandmodellen

5.2.1 Geschematiseerde Westerschelde (Van der Wegen en Roelvink, 2008)

Op de overgang van macrocel 3 en 4 vindt er volgens de balans een verandering plaats in de richting van het netto zandtransport. Ten westen is er een richting die op export duidt, ten oosten is de richting stroomopwaarts. Afhankelijk van de onderliggende aannames van de sedimentbalans komt dit kantelpunt meer zeewaarts of landwaarts te liggen. Het bestaan van een dergelijk punt lijkt theoretisch bevestigd te worden door Van der Wegen en Roelvink (2008), die gebruik maken van een simpel 1D model met ongeveer de Westerschelde afmetingen:

Van der Wegen en Roelvink (2008) hebben een geschematiseerd estuarium bekeken van 80km lang en 2,5km breed met een 1d en 2d model. Gestart is vanuit een vlakke zandige bodem en een lineair oplopende bodem en hebben de bodem veranderingen gedurende enkele duizenden jaren berekend. In Figuur 5.1 is te zien hoe de langsprofielen van de 1D berekeningen verloopt over de tijd. Uit beide berekeningen komt naar voren dat er een omslagpunt ligt rond +/- 50km. Landwaarts van dit punt vindt er ook netto landwaarts transport plaats, zeewaarts van dit punt vindt er ook netto zeewaarts transport plaats. Na 8000 jaar wordt een evenwicht bereikt.

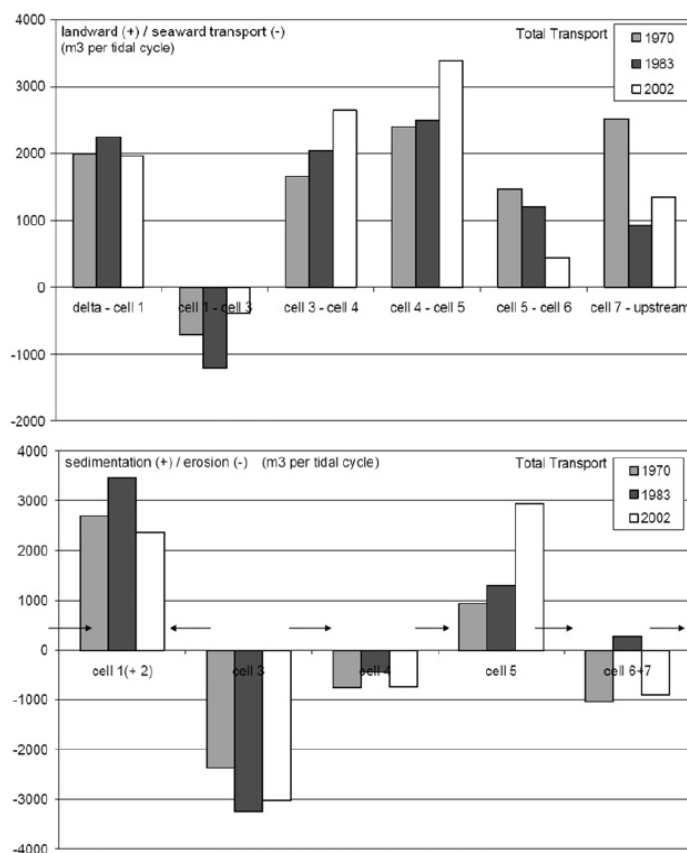


Figuur 5.1: 1D model resultaten; profiel ontwikkeling in een 80km lang estuarium met (a) initieel een vlakke bodem op -10m MSL (b) een lineair oplopende bodem van -15m tot 0m MSL. (Uit: Van der Wegen en Roelvink, 2008)

5.2.2 Delft3d model van Bolle et al., 2010

In Bolle et al., 2010 is onderzocht hoe de verschillende bodemliggingen van de jaren 1970, 1983 en 2002 invloed hebben op het netto transport in de Westerschelde. Het samenvattende plaatje is getoond in Figuur 5.2. De transporten over de macrocellen en de volumeveranderingen per macrocel zijn in dit figuur getoond. Het model laat een import zien van de delta naar cel 1, maar een zeewaarts transport van cel 3 naar cel 1. Achteraf blijkt dat gerekend is met een stroomopwaartse rand bij

Schelle, die een duidelijke tekortkoming bleek. In het kader van deze studie is het Delft3d model verder geactualiseerd, zie volgende paragraaf.



Figuur 5.2: Landwaarts (positief) en zeewaarts (negatief) transport over de Macrocel grenzen (bovenste figuur) en volumeveranderingen binnen de Macrocellen voor de 1970, 1983 en 2002 bathymetrie (onderste figuur) (Uit Bolle et al., 2010)

5.2.3 Geactualiseerd Delft3d model

Met het geactualiseerde Delft3d model van de Schelde zijn morfostatische berekeningen uitgevoerd met bodems van de jaren 1973, 1983, 2006 en 2011 (Consortium Deltares IMDC Svašek Arcadis 2013b). Het model geeft een zandexport bij Vlissingen-Breskens in de orde van $-1.3 \pm 0.6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Bij de Belgisch-Nederlandse grens is dit $+0.13 \pm 0.06 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. De zandexport neemt toe over de tijd en wordt verklaard door het verdiepen van de vaargeul. De netto transporten liggen in dezelfde orde grootte van de resultaten als het FINEL2d model, zie volgende paragraaf. In de Westerschelde is het netto zandtransport volgens het model grotendeels zeewaarts gericht. Dit wordt verklaard door de snelheidsmomenten die ebwaarts transport laten zien.

5.2.4 Geactualiseerd morfologische FINEL2d model

Het morfologische FINEL2d model van de Westerschelde (Dam, 2007) is geactualiseerd binnen dit project (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013a). Tijdens de afregeling is geprobeerd om een import van zand in de Westerschelde te krijgen. Ondanks dat hier veel moeite in is gestoken is dit niet gelukt. Het model laat consistent een export zien van zand over de raai Vlissingen-Breskens. In het kader van de promotie van Gerard Dam is met FINEL2d een hindcast uitgevoerd van de Westerschelde van 1860-1970 (zie ook Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013a). In het model zit verder geen baggeren/storten of zandwinnen. De aanname is dat voor 1970 de menselijke ingrepen in de Westerschelde beperkt waren. Het model kan hierbij de grootschalige morfologische veranderingen vrij goed berekenen. In Figuur 5.3 is de volumeontwikkeling per macrocel van deze

periode geplot. Daarnaast is van de gedigitaliseerde bodems van de oude jaargangen (1860-1931) de volumeontwikkeling bepaald. Ook hier blijkt dat het model de volumeontwikkelingen vrij goed volgt. De westelijke macrocellen laten een export van zand zien (uitgezonderd Mesocel 2). De resulterende toename van het sedimentvolume in deze macrocellen komt overeen met de bevindingen van Bakker en de Loeff (1983), zie ook paragraaf 2.1. Macrocel 5 vertoont een sedimentatie, macrocellen 6 en 7 zijn min of meer stabiel. De volumeveranderingen van zowel de meting als het model zijn niet gecorrigeerd voor menselijke ingrepen. Deze is bij de volumebepaling van het model en de lodingen verder niet bepaald.

In het figuur 5.3 is rechtsonder te zien hoe het totale volume van de Westerschelde verandert vanaf 1860. Zowel de meting als het model laat zien dat er een behoorlijk afname van het volume sediment heeft plaatsgevonden in de Westerschelde (zonder de aangrenzende schorgebieden). Volgens Bakker en De Loeff (1983) heeft in de periode van 1860 tot 1931 nog veel sedimentatie plaats in de schorgebieden, die grotendeels deels later ingepolderd dan wel afgedamd zijn (Braakman, Sloe, Hellegat, Saeftinghe etc), zodat er toch een netto import van sediment heeft plaatsgevonden.

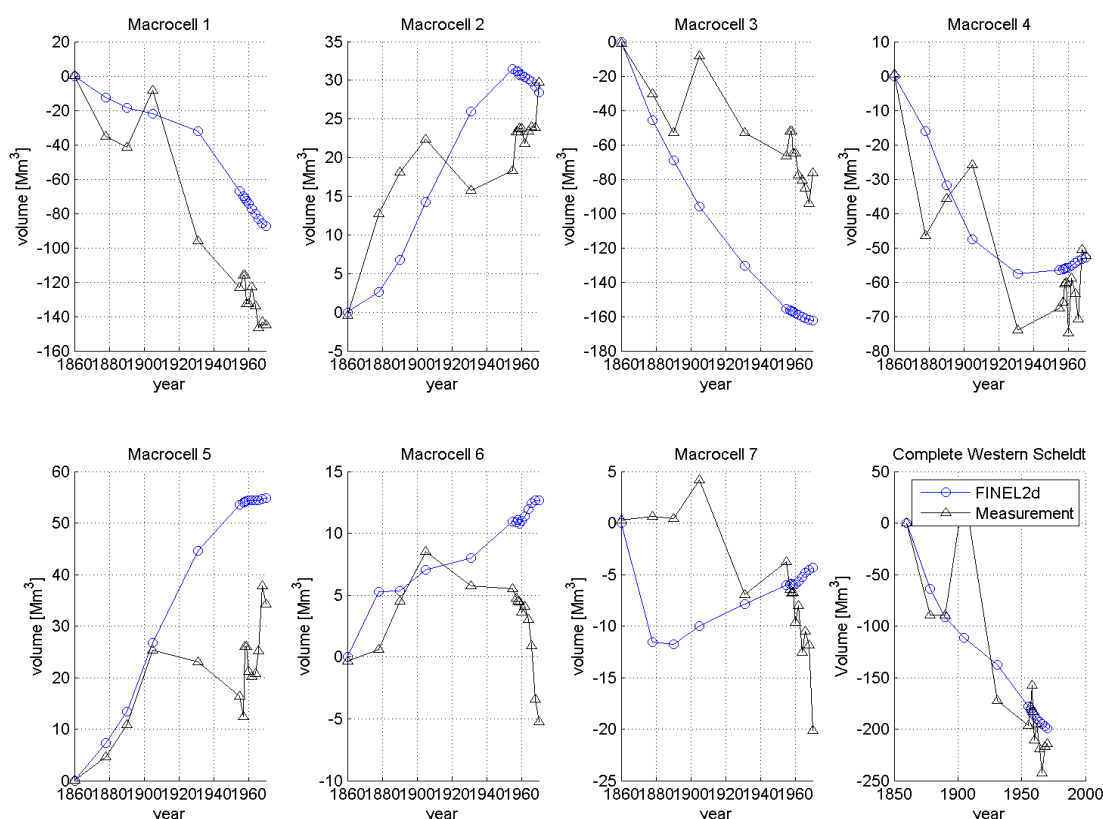
Waarschijnlijk heeft er in deze oude periode weinig afzetting van slib plaatsgevonden in de Westerschelde zelf, maar vooral in de schorgebieden van de Braakman, Sloe, Hellegat, Saeftinghe en Ossendrecht (bij Bath). Hierdoor is te verklaren waarom het zandmodel in deze periode redelijk goede resultaten laat zien voor de volumeontwikkeling.

Voor een recente periode laat het FINEL2d model eenzelfde beeld zien, namelijk een afname van het sedimentvolume in de westelijke macrocellen, waarbij een export van zand plaatsvindt over de lijn Vlissingen-Breskens. Ongeveer op de grens van macrocel 3 en 4 is een omslagpunt, en landwaarts van dit punt vindt netto landwaarts transport plaats richting de Zeeschelde. De export bij Vlissingen-Breskens berekent het model op ongeveer 1 miljoen m³/jaar. Er vindt een netto zandtransport plaats richting België van orde grootte 200.000 m³/jaar.

5.3 Slibmodellen

Levèvre (2000) heeft een slib balans berekend aan de hand van een 3D slib model. Dit model laat een import van slib zien van orde grootte 0.7×10^6 ton/jaar na de 2^e verdieping. De resultaten tonen een verdubbeling van de mariene import van slib door deze tweede verdieping. Dit wordt min of meer bevestigd door de metingen van Chen et al. (2005) die een verdere doordringing van het mariene slib tussen 1992 en 1998 laat zien (zie ook paragraaf 2.3).

Van Kessel et al. (2011) heeft in het kader van LTV O&M een 3D slib model van de Westerschelde ontwikkeld. Dit is geen morfodynamisch model en kan daarom de volumebijdrage van slib zoals in de voorgaande hoofdstukken is bepaald niet bevestigen. De slibconcentraties en de ruimtelijk slibgehalten in de bodem kan het model redelijk goed berekenen.



Figuur 5.3: Volumeveranderingen volgens de lodingen en FINEL2d voor de periode 1860-1970 (niet gecorrigeerd voor menselijke ingrepen)

5.4 Zand/slib model

Recentelijk is het FINEL2d model ook gebruikt om een gecombineerd zand/slib berekening uit te voeren voor de 1860-1970 hindcast zoals in paragraaf 5.2.4 getoond is. Hierbij vindt er zand/slib interactie plaats zoals beschreven door Van Ledden (2003). De zandfractie toont eenzelfde ontwikkeling zoals in paragraaf 5.2.4 getoond is. De slibfractie laat in tegenstelling tot de zandfractie een import zien over de lijn Vlissingen-Breskens en draagt bij aan de totale volumeontwikkeling in het gebied. Verder onderzoek in het kader van de promotie van Gerard Dam is nodig om te kijken hoeveel deze slibbijdrage precies is en of dit beter afgeregeld moet worden.

5.5 Conclusie

Voorheen werd gedacht dat de berekende zandexport van de morfologische modellen (FINEL2d en Delft3d) een modelfout was. Door de sedimentbalans uit te splitsen in zand en slib blijkt dat er hoogstwaarschijnlijk toch een zandexport plaatsvindt in werkelijkheid. De modellen sluiten nu beter op de werkelijkheid aan dan voorheen.

Rond macrocel 3 vindt er een omslag plaats van zandexport naar zandimport (exakte locatie is afhankelijk van aannames). Een dergelijk 'omslagpunt' kan theoretisch bevestigd worden met een simpel 1d morfologisch langsprofiel model en lijkt ook uit geavanceerder 2d modellen te komen.

Slibmodellen lijken de import van marien slib in de Westerschelde te bevestigen.

6 CONCLUSIES EN DISCUSSIE

6.1 Algemeen beeld

Door de sedimentbalans uit te splitsen in een zand- en slibbijdrage wordt een ander beeld van de netto sedimenttransporten verkregen. Er vindt door de Westerschelde heen continu landwaarts transport van marien slib plaats. Dit wordt bevestigd door tracerstudies, modelstudies en voorgaande slibbalans studies. Door de permanente afzetting van slib in vooral secundaire geulen zoals het Vaarwater langs Hoofdplaat en het Middelgat is er een volumebijdrage van slib op de sedimentbalans van de Westerschelde. Een sluitende sedimentbalans resulteert dan in de berekening van export van zand.

6.2 Discrepantie tussen modellen en sedimentbalans

Verschillende morfologische zandmodellen zijn ontwikkeld voor de Westerschelde die, met uitzondering van een voorgaande schematisatie met Delft3d (met een stroomopwaartse rand bij Schelle, die een duidelijke tekortkoming bleek), een export van zand laten zien van het westelijk deel van de Westerschelde naar het mondingsgebied. Tot voor kort werd deze berekende export als een tekortkoming van de modellen beschouwd. Door de sedimentbalans uit te splitsen in een zand- en slibbalans (Hoofdstuk 4) worden voor zand een andere transport richting berekend bij de monding. De export van zand volgens de zandmodellen komt hier meer mee overeen dan bij de balansberekeningen waarbij slib niet apart was beschouwd. De import van marien slib in de Westerschelde lijkt bevestigd te worden door slibmodellen.

Op de overgang van macrocel 3 en 4 vindt er volgens de balans een verandering plaats in de richting van het netto zandtransport. Ten westen is er een richting die op export duidt, ten oosten is de richting stroomopwaarts. Afhankelijk van de onderliggende aannames van de sedimentbalans komt dit kantelpunt meer zeewaarts of landwaarts te liggen. Het bestaan van een dergelijk punt lijkt theoretisch bevestigd te worden door Van der Wegen en Roelvink (2008), die gebruik maken van een simpel 1D model met ongeveer de Westerschelde afmetingen. In het morfologische FINEL2d model van de Westerschelde komt een dergelijk kantelpunt ook voor.

6.3 Onzekerheden

In de zand- en slibbalans zit een aantal aannames waarover discussie mogelijk is. Het transport van zand en slib richting België en Saeftinghe is een belangrijke aanname, evenals de netto sedimentatie van slib. De locatie van het hiervoor beschreven omslagpunt is gevoelig voor de verschillende aannames. Dit geldt niet voor het optreden van export van zand over de lijn Vlissingen-Breskens.

6.4 Aanbevelingen

De nieuwe inzichten zijn van belang voor het beleid dat is gericht op het handhaven van de sedimentvoorraden op lange termijn. Deze inzichten ten aanzien van zandwinning en het baggeren en storten zijn opgenomen in de aanbevelingen die volgen uit de LTV studies. De andere aanbeveling zijn gericht op de Zeeschelde en het toetsen van de gebruikte aannames in de zand- en slibbalans.

- Het verdient aanbeveling om het onderzoek naar de rollen van slib en zand in de sedimentbalans ook voor de Zeeschelde uit te werken.
- Het is van belang om opnieuw de slibgehalten in de bodem met hoge resolutie in kaart te brengen voor een betere schatting van de volumebijdrage van het slib. Dit hoeft niet noodzakelijkerwijs de gehele Westerschelde te omvatten, gerichte bemonstering van de belangrijke sedimentatiegebieden (Vaarwater langs Hoofdplaat, Middelgat, Land van Saeftinghe) kan al een belangrijke toets opleveren van de aannames in de zand- en slibbalans. Het is belangrijk om niet alleen oppervlaktekarteringen uit te voeren van deze gebieden (monsters van de toplaag, al dan niet aangevuld met bijvoorbeeld Medusa-

technieken) maar ook boringen uit te voeren (steekboringen, vibrocorer). Het zand en slib in de boringen kan verduidelijken of slib ook na compactie een belangrijke volumebijdrage heeft geleverd aan de sedimentatie.

- Bakker, W.Th.J.N.P.; de Looff, D. 1977. Onderzoek naar de mogelijkheden tot en de gevolgen van zandwinning in de Westerschelde. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Rijkswaterstaat. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging: Vlissingen. 48 + 7 annexes
- Bolle, A., Wang, Z. B., Amos, C., De Ronde, J., 2010. The influence of changes in tidal asymmetry on residual sediment transport in the Western Scheldt. *Continental Shelf Research* 30 (8), 871-882.
- Consortium Deltares IMDC Svašek Arcadis, 2013a. Actualisatie van het FINEL2d model van de Westerschelde, Rapport A26.
- Consortium Deltares IMDC Svašek Arcadis, 2013b. Influence morphology on tide and sand transport, rapport G4.
- Consortium Deltares IMDC Svašek Arcadis, 2013c. Morfologische lange termijn, ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid, rapport G11.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013d. Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. Rapport G2.
- Chen, M. S., Wartel, S., Eck, B. V., Van Maldegem, D., 2005. Suspended matter in the Scheldt Estuary. *Hydrobiologia* 540 (1-3), 79-104.
- Dam, G., Blik, A. J., Labeur, R. J., Ides, S. J., Plancke, Y. M. G., 2007. Long-term process-based morphological model of the Western Scheldt estuary. *Proceedings of the 4th Rivers, Coasts and Estuarine Morphodynamics Conference*, Enschede. Vol. 2. pp. 1077-1084.
- Deronde, B., Kempeneers, P., & Forster, R. M. 2006. Imaging spectroscopy as a tool to study sediment characteristics on a tidal sandbank in the Westerschelde. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69(3-4), 580-590. doi: 10.1016/j.ecss.2006.05.048
- De Looff, D. 1978. Kaartering van de bodemsamenstelling van het oostelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en Resultaten. Nota WWKZ-78.V013.
- De Looff, D. 1980. Kaartering van de bodemsamenstelling van het westelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en Resultaten. Nota WWKZ-80.V009.
- Dyer, H. R., 1995, Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 423-449.
- Haecon, 2006. Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde
- IMDC, 1991. Gedrag van particulier materiaal in het Schelde-estuarium
- Jacobs, W., 2011. Sand-mud erosion from a soil mechanical perspective. Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
- Levèvre, F. O. B., 2000. Effecten van systeemingrepen op de water- en bodemkwaliteit van de Westerschelde
- Manni, R. J., 1986. Slibtransport en slibbalans in de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Vlissingen.
- McClaren, P., 1994. Sediment Transport in the Western Scheldt between Baarland and Rupelmonde. GeoSea report, GeoSea Consulting, Cambridge, UK.
- Mulder, H.P.J., 1995. De droge dichtheid als functie van het slibgehalte t.b.v. een sediment balans. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIKZ Werkdocument RIKZ/OS-95.614x.
- Nederbragt, G. J., Liek, G. J., 2004. Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding.
- Taveniers, 2000. Beneden-Zeeschelde: slibbalans 1999.

- Ten Brinke, 1992. Slib in het estuarium van de Schelde: Paden en Lotgevallen, deel 1: De grootschalige (semi) natuurlijke slibbeweging
- Ten Brinke, 1994. De menging van marien en fluviatiel slib in het estuarium van de Schelde.
- Terwindt, 1967. Mud transport in the Dutch Delta area and along the adjacent coastline. *Netherlands Journal of Sea Research* 3(4) 505-531.
- Van Alphen, J. S. L. J., 1990. A mud balance for Belgium-Dutch coastal waters between 1969 and 1986. *Netherlands Journal of Sea Research* 25 (1/2), 19-30.
- Van der Wegen, M., Roelvink, J. A., 2008. Long-term morphodynamic evolution of a tidal embayment using a two-dimensional, process-based model. *Journal of Geophysical Research* 114 (C4).
- Van Kessel, T., Vanlede, J., De Kok, J., 2011. Development of a mud transport model for the Scheldt estuary. *Continental Shelf Research* 31 (10), 165-181.
- Van Ledden, M. 2003. Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins. PhD thesis. Delft University of Technology.
- Van Maldegem, D.C., 1993. De slibbalans van het Schelde-estuarium: studierapport.
- Van Maldegem, D. C., Mulder, H. P. J., Langerak, A., 1993. A cohesive sediment balance for the Scheldt estuary. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 27 (2-4), 247-256
- Verlaan, P. A. J. 2000. Marine vs Fluvial Bottom Mud in the Scheldt Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50(5), 627-638. doi: 10.1006/ecss.1999.0599
- Wartel S., Van Eck, G. T. M., 2000. Slibhuishouding van het Schelde estuarium. Koninklijk instituut voor Natuurwetenschappen.
- Zwarts, L. 2004. Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIZA rapport RIZA/2004.028. incl. cd-rom.



COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS